

UNIVERSIDADE DE LISBOA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



## **Qualidade de sinal acústico em ambiente marinho utilizando uma fonte controlada**

Laura Maria Constante da Rocha Reis

**Mestrado em Ciências Geofísicas**  
Especialização em Geofísica Interna

Dissertação orientada por:  
Professor Doutor Luís Matias  
Doutor Rúben Santos

2017

## **Agradecimentos:**

A realização deste trabalho só foi possível graças a todas as pessoas e entidades que, directa ou indirectamente, contribuíram para o meu percurso pessoal e académico, tendo-me ajudado a superar este desafio.

Gostaria de deixar um agradecimento especial aos meus orientadores Professor Doutor Luís Matias e Doutor Rúben Santos pela paciência, troca de conhecimento e experiências que constituíram uma enorme mais-valia para cumprir este desafio.

Ao Instituto Hidrográfico, na pessoa do seu Director Geral Contra-Almirante António Manuel de Carvalho Coelho Cândido, pela cedência de dados meios e condições logísticas que foram imprescindíveis para a realização do presente trabalho.

Ao Arsenal do Alfeite S.A. e Serviço de Acústica Submarina pela cedência de meios que foram imprescindíveis para a realização do presente trabalho.

À chefe da Divisão de Geologia Marinha do Instituto Hidrográfico, Doutora Aurora Rodrigues Bizarro, que me deu a oportunidade e as condições para alargar os horizontes com este desafio.

Ao Mestre Dr. Luís Soares Rosa pela dedicação, inspiração e por ser a semente que conduziu a este e muitos outros trabalhos.

A todos os meus colegas da Divisão de Geologia Marinha do Instituto Hidrográfico, nomeadamente, João Duarte, Joaquim Pombo, Anabela Oliveira, Aida Seabra, Cesarina Pádua, Cecília Luz, Milton Cabral, Sandra Moreira, Raquel Melo e Rui Quartau, cujo espírito de equipa e camaradagem permite todos os dias a evolução do conhecimento.

Aos meus colegas de mestrado Daniela Bolrão, Renan Tromm e Miguel Neves pela paciência, pelos ensinamentos e pela alegria transmitida todos os dias, principalmente nos dias mais desafiadores.

A todos os meus Amigos da escola Pró≡vida.

Aos meus amigos Sandra Silva, Catarina Fradique, Ana Santos, Mónica Ribeiro, Rita Santos, Pedro Caetano Mendes, Frederico Ferreira, André Costa e Nuno Lapa pelo apoio incansável e motivação ao longo de todo este processo.

À minha mãe Adelaide, ao meu Pai Aureliano e à minha Madrinha Laura que incansavelmente e desde que respiro me fazem ter fé.

Por fim, apesar de não haver palavras que possam alguma vez exprimir o que fizeram por mim, a Ana Reis, Roberto Bito e Cristina Gomes, pelo seu amor e aprovação incondicionais e por me terem guiado até este momento, e pelos mais que hão-de vir.

E muito mais haverá a agradecer sempre...

## **Resumo:**

A presente dissertação tem como objectivo analisar o comportamento de uma fonte acústica em forma de pistão (tipo *boomer*) em ambiente controlado. Foram realizados diversos ensaios com a fonte acústica e um hidrofone calibrado num tanque anecóico, de forma a determinar um conjunto de parâmetros (repetibilidade do sinal, níveis de pressão, reverberação e espectros de frequência) que podem sofrer alterações ao longo do tempo devido à degradação dos componentes da fonte acústica. Foram criadas rotinas em MatLab para processamento de dados, sendo esta informação interpretada de forma a descrever e avaliar a qualidade do sinal acústico emitido por esta fonte, tendo como referência a informação fornecida pelo fabricante.

Com a aplicação desta metodologia ao longo do tempo de vida das fontes acústicas, será possível identificar a degradação da qualidade do sinal e assim planejar a manutenção preventiva, garantindo que o sinal emitido está consoante os parâmetros do fabricante. Desta forma será mantida/ou/garantida a qualidade dos resultados dos trabalhos de reflexão sísmica.

**Palavras chave:** acústica, ondas acústicas, sinal acústico, boomer, tanque anecóico, conversão electroacústica, níveis de pressão, repetibilidade de sinal acústico, espectros de frequência.

## **Abstract:**

This dissertation intends to analyse the behaviour of a piston shaped acoustic source (boomer) in a controlled environment. Several measurements were made with the acoustic source and a calibrated hydrophone in an anechoic tank, in order to determine a set of parameters (signal repeatability, sound pressure levels, reverberation and frequency spectrums) which can be altered through time due to the acoustic source component degradation. With the data, MatLab scripts and functions were created in order to interpret and describe the acoustic signal quality emitted by the boomer source, considering the manufacturer's information.

Applying this methodology and processing routines to the seismic source, it will be possible to identify the signal degradation, allowing to plan the maintenance and assuring that the source signal is in accordance with the manufacturer's parameters. Consequently, future seismic survey's outcome will maintain and ensure the data quality.

**Key words:** acoustics, acoustic waves, acoustic signal, boomer, anechoic tank, electroacoustic conversion, sound pressure levels, acoustic signal repeatability, frequency spectrum.

# ÍNDICE

Agradecimentos:.....	i
Resumo:.....	ii
Abstract: .....	iii
Índice de Figuras .....	vi
Índice de Tabelas.....	ix
Capítulo 1: Introdução e Conceitos Fundamentais.....	1
1.1    Introdução.....	1
1.2    Conceitos Fundamentais.....	2
1.2.1    Propagação do som no tempo e espaço (Ondas acústicas).....	2
1.2.2    Parâmetros fundamentais.....	6
1.2.3    Níveis em Decibéis: Notação Logarítmica.....	8
1.2.4    Intensidade e potência .....	9
1.2.5    Efeitos de atenuação.....	10
1.2.5.1    Divergência Esférica .....	10
1.2.5.2    Efeitos de Absorção.....	11
1.2.6    Velocidade do som .....	13
1.2.7    Aproximação à onda plana .....	14
1.2.7.1    Campo próximo (Distância de Fresnel) e Campo Distante .....	15
Capítulo 2: Conversão Electroacústica.....	19
2.1    Conversão Analógico para Digital .....	19
2.1.1    Amostragem .....	19
2.1.2    Domínio da frequência .....	20
2.1.3    Discretização .....	21
2.2    Características Fundamentais dos Transdutores.....	23
2.2.1    Sensibilidade .....	23
2.2.2    Resposta em frequência.....	24
2.2.3    Directividade .....	25
Capítulo 3: Instrumentação e Metodologia .....	28
3.1    Tanque Anecóico.....	28
3.2    Instrumentação .....	29
3.2.1    Sistema CSP300 e placa boomer AA200 .....	29
3.2.2    Hidrofone RESON TC4034 e Pré-amplificador VP2000.....	32
3.2.3    Carta de conversão analógico/digital NI DAQ USB-6251 .....	35
3.3    Descrição do Método.....	36

3.3.1 Disposição dos equipamentos.....	36
3.3.2 Parametrização .....	39
Capítulo 4 - Processamento dos dados e Resultados.....	43
4.1 Processamento de Dados .....	43
4.2 Resultados .....	49
4.2.1 Fase I .....	50
4.2.2 Fase II.....	55
4.2.3 Fase III.....	57
Capítulo 5 – Discussão dos Resultados e Considerações Finais .....	63
5.1 Discussão dos Resultados.....	63
5.2 Considerações Finais .....	67
Bibliografia.....	69
ANEXO I: Análise de Repetibilidade .....	71
ANEXO II: Análise no Domínio do Tempo.....	78
ANEXO III: Certificado de Calibração.....	85
ANEXO IV: Efeitos de Absorção .....	86

## Índice de Figuras

Figura 1. 1 – Representação da compressão e rarefacção das partículas na presença de uma fonte acústica.....	3
Figura 1. 2 - Propagação da frente de onda a partir de uma fonte pontual (ponto azul) de acordo com o princípio de Huygens. Os pontos vermelhos representam fontes secundárias. Adaptado de Medwin & Clay (1998, p.20).....	6
Figura 1. 3 - Esquema de representação de um impulso acústico em amplitude (V) vs tempo (s) e respectivas amplitudes de pico máximo, mínimo e RMS. ....	7
Figura 1. 4 - Esquema de representação do impulso acústico da Figura 1. 3 e respectiva delimitação do comprimento do impulso.....	8
Figura 1. 5 - Esquema representativo da propagação de uma frente de onda a partir de uma fonte acústica pontual. Sendo $R_0$ e $R_1$ , as distâncias radiais da fonte e $i_0$ e $i_1$ os vectores que representam intensidade.....	10
Figura 1. 6 - Absorção em água salgada (pH 8, Salinidade $35^0/00$ ) determinada de acordo com a equação de François & Garrison (1982) a três temperaturas (°C) e para frequências entre 100 Hz e 1 MHz. Estão também representadas as contribuições da água pura na três temperaturas (François & Garrison, 1982).....	12
Figura 1. 7 - Relação entre perda na transmissão ( <i>Transmission Loss</i> ), por divergência esférica e absorção, e a distância ( <i>Distance</i> ). A curva A representa a frequência de 1 kHz, B a 10 kHz e C a 50 kHz (Kinsler, et al., 1982; Pp 399). Note-se que em A apenas domina a divergência esférica, ou seja, para frequências de 1 kHz, são necessárias distâncias superiores às determinadas neste gráfico, para observar o efeito da absorção. ....	13
Figura 1. 8 - Esquema geométrico para a aproximação da onda plana. ....	14
Figura 1. 9 - Nível de pressão da fonte ( <i>relative SPL</i> ) vs distância ( <i>range</i> ), para uma fonte em forma de pistão circular com raio de 6 m, frequência de 1,2 kHz. <i>Near Field</i> : campo próximo; <i>Fresnel Distance</i> : distância de Fresnel; <i>Far Field</i> : campo distante; <i>spherical spreading</i> : divergência esférica (Erbe, 2011).....	16
 Figura 2. 1 - Dois exemplos de amostragem. Em cima o sinal é bem amostrado e a representação através da sequência de amostras é muito próxima do sinal analógico. Em baixo o sinal tem uma taxa de amostragem muito lenta relativamente à frequência do sinal analógico. Esta representação está falseada. As amostras estão representadas pelos pontos. (NI, 2004). ....	19
Figura 2. 2 - Representação gráfica de um sinal sinusoidal em função do tempo, onde se observa um exemplo de sinal com <i>clipping</i> (à direita do risco vermelho). Numa situação ideal a amplitude ocupa cerca de 80% da janela de digitalização (à esquerda do risco vermelho).....	22
Figura 2. 3 - (À esquerda) Curva típica da resposta em frequência de um hidrofone. A frequência de ressonância $f_0$ é rejeitada na utilização como receptor, sendo a largura de banda B a área de utilização como receptor. (À direita) Resposta em frequência típica de um transmissor com largura de banda de $\delta f_{-3dB}$ . ....	24
Figura 2. 4 - Variação do índice de directividade (em cima) e largura do feixe (em baixo) para uma fonte em forma de disco com 38 cm de diâmetro, em função da frequência. ....	26
Figura 2. 5 - (esquerda) impulso de uma fonte do tipo boomer medido em campo distante no eixo principal e com um desvio de 30° relativamente ao eixo. (direita) Respectivas respostas espectrais (Simpkin, 2005).....	27

Figura 2. 6 - (esquerda) Pressões de pico do impulso de **120 $\mu$ s** de uma fonte do tipo boomer. (direita) Banda de frequências do impulso de **120 $\mu$ s** de uma fonte do tipo boomer, medidas com atenuação de 3 dB (Simpkin, 2005). ..... 27

Figura 3. 1 - O tanque anecóico utilizado nas medições. .... 28

Figura 3. 2 - Fonte de energia APPLIED ACOUSTIC ENGINEERING CSP300P. .... 29

Figura 3. 3 - Placa *boomer* APPLIED ACOUSTIC ENGINEERING AA200 montada em *catamaran*. ..... 30

Figura 3. 4 - Resposta em tempo típica de um impulso gerado pela placa boomer AA200 (AAE, Sound Source Operating Manual, 2003). .... 31

Figura 3. 5 - Resposta em frequência do impulso gerado a partir da placa boomer AA200. Os pontos representados no gráfico definem uma largura de banda do sistema entre 250 Hz e 9105 Hz a -6 dB (AAE, Sound Source Operating Manual, 2003). .... 31

Figura 3. 6 - À esquerda hidrofone RESON TC4034, à direita o pré-amplificador VP2000 (RESON, 2011). .... 32

Figura 3. 7 - Resposta em frequência do hidrofone RESON TC4034 (RESON, 2011). .... 33

Figura 3. 8 - Padrão de directividade horizontal para as frequências de 100, 200 e 300 kHz. .... 33

Figura 3. 9 - Características dos filtros passa-alto para cada frequência de corte. .... 34

Figura 3. 10 - Características dos filtros passa-baixo para cada frequência de corte. .... 34

Figura 3. 11 - Características dos ganhos do pré-amplificador em função da frequência. .... 34

Figura 3. 12 - Espectro de densidade de potência do ruído do pré-amplificador para uma carga de entrada de 1 nF, ganho de 0 dB e um filtro de 1Hz. .... 35

Figura 3. 13 - Carta ADC NI DAQ USB-6251 (N.I., 2008). .... 35

Figura 3. 14 - Distribuição dos blocos de aquisição e de transmissão de acordo com a geometria das instalações. Foi tido em consideração a separação da linha de transmissão e da linha de aquisição para que não houvesse interferência de correntes parasitas. Legenda: H - hidrofone; B - fonte acústica do tipo boomer; *d* – distância entre fonte acústica e hidrofone. .... 37

Figura 3. 15 - Descrição das ligações da fonte de energia CSP300. .... 37

Figura 3. 16 - (a) e (b) Suspensão da estrutura da placa boomer com o peso na base e cabo HV4000 ligado, vista de baixo em (b) e vista de cima em (a); (c) toda a estrutura mergulhada no tanque. .... 38

Figura 3. 17 - Colocação do hidrofone na vara devidamente posicionado. .... 38

Figura 3. 18 - Exemplo de representação gráfica em matlab dos dados *RAW* registados no ficheiro TDMS. Foram guardados 375 disparos da fonte num total de 1875000 amostras. Cada disparo tem 100 ms de comprimento de gravação. A zona assinalada a tracejado está amplificada na Figura 3. 19. .... 40

Figura 3. 19 - Amplificação da zona assinalada na Figura 3. 18. Observam-se 5 disparos. .... 40

Figura 4. 1 - (a) Estrutura completa do formato TDMS e respectiva informação aí contida; (b) Localização dos dados digitalizados; (c) Todos os dados digitalizados. .... 43

Figura 4. 2 - Conjunto de dados *RAW* obtidos num ensaio com a placa boomer a 100 J e 1 m de distância do hidrofone. O sinal foi amplificado 20 dB. .... 44

Figura 4. 3 - Análise de repetibilidade a um ensaio efectuado com 100 J de energia, à distância de 1 m entre a fonte e o receptor. À esquerda análise com o método de correlação cruzada e à direita com o método de Verbeek & McGee (1995). .... 46



Figura 4. 4 - Sinal médio e respectivos parâmetros de referência correspondente à aquisição analisada na Figura 4. 3.....	46
Figura 4. 5 - Dados de sensibilidade fornecido pelo fabricante, para o hidrofone utilizado no âmbito deste trabalho.....	47
Figura 4. 6 - Resposta espectral do sinal da Figura 4. 4 considerando toda a janela.....	48
Figura 4. 7 - Determinação do coeficiente de absorção para água pura sugerido por François & Garrison (1982), para as temperaturas de 0, 10, 20 e 30°C. ....	49
Figura 4. 8 - Resultados em amplitude (V) em função do tempo para a distância de 1 m e energias de 100, 200 e 300 J.....	51
Figura 4. 9 - Resultados em amplitude (V) em função do tempo para a distância de 2 m e energias de 100, 200 e 300 J.....	51
Figura 4. 10 - Resultados em amplitude (V) em função do tempo para a distância de 3 m e energias de 100, 200 e 300 J.....	52
Figura 4. 11 - Sinais transmitidos com 100 J de energia às distâncias de 1, 2 e 3 m. ....	52
Figura 4. 12 - Sinais transmitidos com 200 J de energia às distâncias de 1, 2 e 3 m. ....	52
Figura 4. 13 - Sinais transmitidos com 300 J de energia às distâncias de 1, 2 e 3 m. ....	53
Figura 4. 14 - Espectro de frequências ( <i>Power Spectrum</i> ) dos sinais representados na Figura 4. 8 (Energias de 100, 200 e 300 J à distância entre transdutores de 1 m). ....	54
Figura 4. 15 - Espectro de frequências ( <i>Power Spectrum</i> ) dos sinais representados na Figura 4. 9 (Energias de 100, 200 e 300 J à distância entre transdutores de 2 m). ....	54
Figura 4. 16 - Espectro de frequências ( <i>Power Spectrum</i> ) dos sinais representados na Figura 4. 10 (Energias de 100, 200 e 300 J à distância entre transdutores de 3 m). ....	55
Figura 4. 17 - Resultados em amplitude (V) em função do tempo para a distância de 2 m e energias de 100 e 200 J.....	56
Figura 4. 18 - Espectro de frequências dos sinais representados na Figura 48 (Energias de 100 e 200 J à distância entre transdutores de 2 m). ....	57
Figura 4. 19 - Resultados em amplitude (V) em função do tempo para a distância de 1 m e energias de 100, 200 e 300 J.....	58
Figura 4. 20 - Resultados em amplitude (V) em função do tempo para a distância de 2 m e energias de 100, 200 e 300 J.....	59
Figura 4. 21 - Resultados em amplitude (V) em função do tempo para a distância de 3 m e energias de 100 e 200 J.....	59
Figura 4. 22 - Sinais transmitidos com 100 J de energia às distâncias de 1, 2 e 3 m. ....	59
Figura 4. 23 - Sinais transmitidos com 200 J de energia às distâncias de 1, 2 e 3 m. ....	60
Figura 4. 24 - Sinais transmitidos com 300 J de energia às distâncias de 1, 2 e 3 m. ....	60
Figura 4. 25 - Espectro de frequências dos sinais representados na Figura 4. 19 (Energias de 100, 200 e 300 J à distância entre transdutores de 1 m).....	61
Figura 4. 26 - Espectro de frequências dos sinais representados na Figura 4. 20 (Energias de 100, 200 e 300 J à distância entre transdutores de 2 m).....	61
Figura 4. 27 - Espectro de frequências dos sinais representados na Figura 4. 21 (Energias de 100 e 200 J à distância entre transdutores de 3 m).....	62
Figura 5. 1 - Representação da frequência máxima com atenuação de 6 dB, para os dados da Fase I a 1 m (à esquerda) e 2 m (à direita).....	65
Figura 5. 2 - Representação da frequência máxima com atenuação de 6 dB, para os dados da Fase II.....	66
Figura 5. 3 - Representação da frequência máxima com atenuação de 6 dB, para os dados da Fase III a 1 m (à esquerda) e 2 m (à direita).....	66

Figura 5. 4 - Representação da frequência máxima com atenuação de 6 dB, para os dados da Fase III a 3 m.....	66
--	----

## Índice de Tabelas

Tabela 4. 1 - Parâmetros utilizados nas três fases de ensaios.....	50
Tabela 4. 2 - Análise de repetibilidade em todos os ensaios da Fase I.....	51
Tabela 4. 3 - Parâmetros determinados a partir dos dados de amplitude em função do tempo.....	53
Tabela 4. 4 - Valores determinados relativamente aos níveis de pressão. SPL (nível de pressão acústica) e SL (nível da fonte à distância de referencia de 1 m). .....	55
Tabela 4. 5 - Análise de repetibilidade em todos os ensaios da Fase II. ....	56
Tabela 4. 6 - Parâmetros determinados a partir dos dados de amplitude em função do tempo.....	56
Tabela 4. 7 - Valores determinados relativamente aos níveis de pressão. SPL (nível de pressão acústica) e SL (nível da fonte à distância de referência de 1 m). .....	57
Tabela 4. 8 - Análise de repetibilidade em todos os ensaios da Fase III. ....	58
Tabela 4. 9 - Parâmetros determinados a partir dos dados de amplitude em função do tempo.....	60
Tabela 4. 10 - Valores determinados relativamente aos níveis de pressão. SPL (nível de pressão acústica) e SL (nível da fonte à distância de referencia de 1 m). .....	62
 Tabela 5. 1 - Resumo dos resultados da calibração da placa boomer pelo fabricante (ver ANEXO III: Certificado de Calibração).....	64
Tabela 5. 2 - Valores de frequência máxima para a qual o impulso atenua 6 dB ( <b><i>W</i> – 6dB</b> ), de acordo com a definição de Simpkin (2005). ....	65

## Capítulo 1: Introdução e Conceitos Fundamentais

### 1.1 Introdução

Existe no serviço público a crescente necessidade de aumentar o tempo de vida útil de equipamentos que, com o avanço rápido da tecnologia, se tornam obsoletos mais rapidamente, o que constitui um acréscimo no esforço financeiro da instituição pública. Um dos passos mais importantes para manter equipamentos quase obsoletos em pleno funcionamento, é a calibração e manutenção dos mesmos. Surgiu então a necessidade de conhecer com detalhe os parâmetros e características que dariam origem a uma avaliação da qualidade dos sistemas.

Este estudo permitirá compreender a frequência com que se devem efectuar manutenções, assim como determinar se existem outros tipos de anomalias no sistema, melhorando assim o serviço público prestado, controlando custos desnecessários e mantendo a capacidade de trabalho da instituição.

O sistema seleccionado para este estudo é utilizado em prospecção sísmica de alta resolução. É um sistema que gera ondas de pressão, ou acústicas, em meio aquático e cujas reflexões resultam numa imagem da estrutura geológica abaixo do fundo. Ondas acústicas em meio aquático podem ser geradas utilizando diversos tipos de mecanismos, desde a geração de uma explosão, implosão, aceleração de massa de água ou gerando uma forma de onda controlada (Mosher, Simpkin, & Dickey, 1999). Entre as fontes explosivas podemos encontrar o TNT (utilizado a seguir à Segunda Guerra Mundial) ou os *sparker*, muito utilizados actualmente, que são constituídos por um conjunto de eléctrodos que produzem uma descarga eléctrica e consequentemente fazem aquecimento óhmico<sup>a</sup> da água salgada, gerando uma bolha de vapor. As fontes implosivas utilizam o vácuo ou a implosão de uma bolha para gerar uma onda de pressão, as mais utilizadas actualmente são os *water-gun*. As fontes de aceleração de massa de água utilizam um mecanismo de movimento rápido da massa de água, os mais comuns actualmente são os *air-gun*, que operam libertando repentinamente um grande volume de ar, ou os *boomer* que consistem na deslocação de uma placa após indução de um campo electromagnético. Os sistemas de forma de onda controlada, são mecanismos que operam a partir do princípio de que um campo eléctrico aplicado a um material piezoelectrico resulta numa deformação mecânica proporcional à força do campo eléctrico. Como exemplo destes sistemas existem actualmente os sonares, os *Chirps*, entre outros. Para a recepção e leitura da onda de pressão, são utilizados diversos tipos de sistemas, sendo os piezoelectricos os mais amplamente utilizados. Denominam-se hidrofones, e podem ser utilizados isoladamente ou em conjuntos ligados em série.

O objectivo deste trabalho é efectuar a análise da qualidade do sinal acústico gerado por uma fonte em forma de pistão (tipo *boomer*). Para se atingir este objectivo é necessário um ambiente controlado, para reduzir ruídos ambientais ou reflexões do sinal em diversos objectos (superfície da água e fundo). Este ambiente controlado é conseguido num tanque anecóico, ou seja, um tanque com isolamento acústico que impede as reflexões do sinal nas suas paredes, fundo e superfície da água. Desta forma, foi possível realizar vários ensaios, utilizando três energias de transmissão da fonte acústica (100, 200 e 300 J) a três distâncias (1, 2 e 3 m) entre a fonte acústica e o hidrofone calibrado que recebe o sinal. Os sinais registados permitiram a análise da repetibilidade do sinal da fonte

<sup>a</sup> Ou aquecimento/efeito Joule, ocorre quando um condutor é aquecido ao ser percorrido por uma corrente eléctrica, como consequência, ocorre transformação de energia eléctrica em energia térmica.

acústica, a determinação dos parâmetros de calibração da fonte acústica e o espectro de frequência. A análise destes parâmetros permitiu estabelecer procedimentos de controlo de qualidade ao sinal através da comparação dos parâmetros de referência fornecidos pelo fabricante da fonte acústica e pelo certificado de calibração da placa.

O procedimento desenvolvido consistiu em estabelecer a geometria de aquisição do sinal no tanque e no desenvolvimento de códigos em MatLab, para automatizar o cálculo destes parâmetros e visualizar os resultados de forma mais expedita.

Foram efectuadas três campanhas de ensaios, doravante designadas por Fases. A Fase I foi realizada em Outubro de 2014, tendo sido a primeira abordagem para a obtenção de dados que serão processados no âmbito deste trabalho. A Fase II foi realizada em Outubro de 2015, após suspeita de uma anomalia no sistema, justificada a partir da observação de alguns perfis sísmicos obtidos no âmbito de outras campanhas. Foi efectuada uma análise preliminar do comportamento do sinal acústico sendo justificação suficiente para um pedido de calibração junto do fornecedor. Após a Fase II foi efectuada uma calibração em Abril de 2016. A Fase III foi efectuada em Junho de 2016 com o objectivo de obter dados de referência para próximas avaliações. Os resultados obtidos serão comparados entre si e com a informação fornecida pelo fabricante. Será possível a obtenção de conhecimento e o desenvolvimento de procedimentos de processamento de dados, que no futuro serão aplicados para este tipo de avaliação e serão desenvolvidos para outros tipos de equipamentos.

Este trabalho está dividido em cinco capítulos que compreendem uma descrição de conceitos fundamentais de acústica e de conversão electroacústica que resumem o estado da arte relativamente aos conceitos que irão ser necessários para cumprir o objectivo deste trabalho. Segue-se a descrição dos equipamentos e método utilizado para a aquisição de dados. Descreve-se o processamento dos dados com recurso à programação em MatLab e, finalmente, a discussão dos resultados e considerações finais é explorada no último capítulo.

## **1.2 Conceitos Fundamentais**

Este capítulo tem como objectivo a definição, representação e análise da propagação de ondas acústicas em meio aquático, de uma forma generalizada. No âmbito deste trabalho, irão ser desenvolvidos métodos de observação e avaliação de sinais acústicos produzidos por fontes que geram impulsos acústicos no meio aquático. No entanto, de forma a definir os conceitos físicos fundamentais da acústica submarina é necessário considerar os princípios base da física associados ao estudo de ondas sonoras.

### **1.2.1 Propagação do som no tempo e espaço (Ondas acústicas)**

O som é a propagação duma perturbação mecânica num meio. O âmbito deste trabalho restringe-se ao estudo da propagação do som na água e, como tal, serão utilizados os conceitos e leis da Acústica, em que o meio de propagação é um fluido.

Para a propagação do som existem, no meio, variações de pressão. A variação da pressão base no meio, irá reflectir-se em séries de compressões e rarefacções de um ponto para o seguinte,

delineando a propagação da onda sonora (**Figura 1. 1**). O meio é constituído por partículas, que no seu conjunto, apresentam características específicas de compressibilidade e densidade.

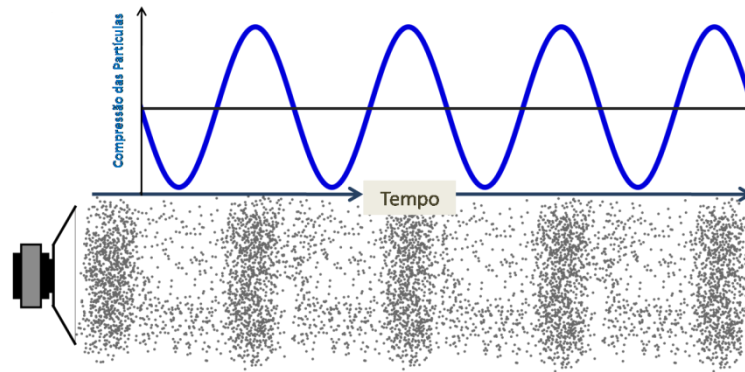


Figura 1. 1 – Representação da compressão e rarefação das partículas na presença de uma fonte acústica.

De forma a descrever os princípios físicos fundamentais que regem a propagação do som é necessário considerar a conservação de momento (ou segunda lei de Newton), a conservação de massa e a equação de estado que traduz a relação entre as propriedades termodinâmicas do meio. As equações do movimento que resultam da aplicação destes princípios são complexas e não lineares. Para a acústica é utilizada uma aproximação linear, de 1ª ordem, a estas equações que se pode aplicar nas condições em que os efeitos não lineares possam ser desprezados.

Para um meio fluido os parâmetros de maior importância para o estudo da propagação do som são a **pressão acústica** ( $p$ ) e a **densidade acústica** ( $\rho$ ), que se definem como sendo a diferença entre as grandezas totais ( $p_{Tot}$  e  $\rho_{Tot}$ ) e as grandezas de equilíbrio ( $P_0$  e  $\rho_0$ ), medidas na ausência da perturbação que se propaga na direcção  $\vec{r}$ , durante o tempo  $t$ :

$$p(\vec{r}, t) = p_{Tot}(\vec{r}, t) - P_0 \quad (1.1)$$

$$\rho(\vec{r}, t) = \rho_{Tot}(\vec{r}, t) - \rho_0 \quad (1.2)$$

O som num fluido propaga-se sob a forma de ondas que traduzem uma propagação de energia, mas não correspondem a um transporte de massa. As equações que regem a propagação do som que são usadas em Acústica obtêm-se a partir dos princípios básicos enunciados antes, admitindo as seguintes premissas (Zielinski, 2017):

- i) O efeito da gravidade é desprezado. Desta forma as propriedades de equilíbrio do fluido,  $P_0$  e  $\rho_0$ , podem ser consideradas constantes e o meio será homogêneo;
- ii) Os efeitos dissipativos devido à viscosidade do meio e à condução de calor são desprezados;

iii) O fluido é isotrópico e perfeitamente elástico;

iv) As perturbações causadas pelo som são pequenas, quando comparadas com os valores de equilíbrio. Daqui resulta também que a velocidade das partículas do meio causadas pela propagação do som será pequena.

Admitindo as condições anteriores é possível mostrar que a pressão acústica obedece à equação de propagação das ondas dada por (Medwin & Clay, 1998) (Zielinski, 2017):

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 p$$

(1.3)

O símbolo  $\nabla^2$  traduz o operador Laplaciano e em coordenadas cartesianas ( $x, y$  e  $z$ ) toma a forma:

$$\nabla^2 p = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2}$$

(1.4)

Na equação (1.3)  $c$  representa a **velocidade do som** no meio. Se considerarmos que o meio é um fluido, a velocidade do som é função do módulo de volume,  $K$ , (ou de incompressibilidade, o *bulk modulus*<sup>b</sup>) e da densidade do meio,  $\rho$  (Zielinski, 2017):

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

(1.5)

Exprimindo a equação (1.3) a uma dimensão espacial ( $x$ ) obtemos:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \frac{d^2 p}{dx^2}$$

(1.6)

Qualquer função  $f(x - ct)$  ou  $g(x + ct)$  é solução desta equação diferencial. A função  $f$  representa uma perturbação propagando-se no sentido positivo do eixo dos  $XX$  enquanto a função  $g$

<sup>b</sup> Quantifica a variação de volume ou densidade devido a variações de pressão.

representa uma perturbação que se propaga no sentido negativo desse eixo. O argumento destas funções é designado por **fase da perturbação**.

Uma **onda sinusoidal** é uma solução particular da equação das ondas. A uma dimensão uma onda sinusoidal de **frequência angular**  $\omega$ , propagando-se no sentido positivo de  $XX$ , escreve-se de forma geral como:

$$p = p_0 \sin(kx - \omega t + \phi_0)$$

(1.7)

O argumento da função seno é a fase da onda,  $\phi = kx - \omega t + \phi_0$ , em que  $\phi_0$  é a fase inicial da onda,  $k$  é o número de onda definido por  $k = 2\pi/\lambda$ , sendo  $\lambda$  o comprimento de onda da perturbação e  $\omega$  a frequência angular definida por  $\omega = 2\pi f$ , sendo  $f$  a frequência da onda.

A onda acústica pode então ser representada por uma sinusóide caracterizada por um **comprimento de onda** ( $\lambda$ ) e **frequência** ( $f$  em ciclos por segundo ou Hz). O **período** ( $T$ ) representa a duração de um ciclo elementar de vibração, estando relacionado com a frequência por  $T = 1/f$ .

A **velocidade de propagação do som** no meio ( $c$ ), pode ser relacionada com a frequência ( $f$ ) da seguinte forma:

$$c = \frac{\omega}{k} = \frac{\lambda}{T} = \lambda f$$

(1.8)

Considerando uma onda que se propaga continuamente no espaço com o decorrer do tempo, todos os pontos ao longo da superfície que se encontrem no mesmo estado de vibração (ou seja, em fase) e de onde se irá desenvolver o deslocamento, chama-se **frente de onda**. A frente de onda será esférica, em meio homogéneo, a partir de uma fonte pontual. O trajecto perpendicular à frente de onda, denomina-se **raio**. O raio corresponde, portanto, ao trajecto percorrido pela energia da perturbação.

As ondas a três dimensões são processos complexos de descrever, o **Princípio de Huygens** (Christaan Huygens, 1629-1695, publicado cerca de 1690) descreve como a onda se movimenta no espaço, entre outros fenómenos que saem do âmbito deste trabalho. De acordo com este princípio cada ponto numa frente de onda que avança pode ser considerado como uma fonte de ondas secundárias que se movem como ondeletas esféricas num meio isotrópico. A superfície externa que envolve todas estas ondeletas constitui a nova frente de onda (**Figura 1. 2**). Na direcção do raio sísmico, para um meio isotrópico, a distância de avanço da frente de onda é dada por:

$$\Delta R = c \Delta t$$

(1.9)

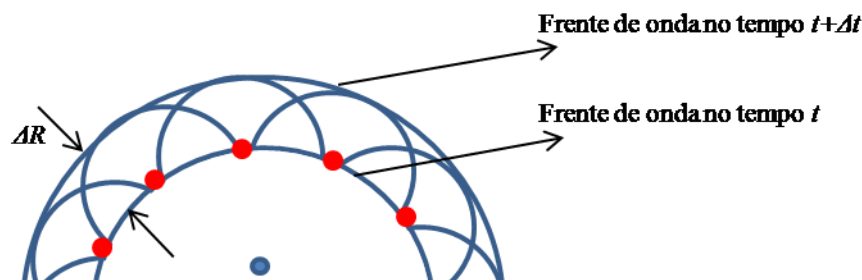


Figura 1. 2 - Propagação da frente de onda a partir de uma fonte pontual (ponto azul) de acordo com o princípio de Huygens. Os pontos vermelhos representam fontes secundárias. Adaptado de Medwin & Clay (1998, p.20).

### 1.2.2 Parâmetros fundamentais

Como já foi referido anteriormente o som corresponde a uma perturbação no meio em que se propaga. Essa perturbação pode ser descrita como uma variação de pressão no meio. A pressão acústica é portanto a diferença entre a pressão instantânea total e a pressão em equilíbrio (na ausência de perturbação). Este é o parâmetro com maior utilidade em acústica, sendo fácil de medir através de hidrofones e detectável pelos órgãos auditivos de muitas espécies. A unidade de medida da pressão é o pascal ( $Pa$ ), equivalente a newton por metro quadrado ( $N/m^2$ ) de acordo com o Sistema Internacional de Unidades (S.I.). Os hidrofones são equipamentos, geralmente piezoelétricos, que traduzem as variações de pressão em sinal elétrico, sendo este sinal medido em Volts.

No âmbito deste trabalho irão ser desenvolvidos métodos de observação e avaliação de sinais acústicos produzidos por fontes que geram impulsos acústicos no meio aquático. De acordo com Newton, um impulso é gerado aplicando uma força num ponto durante determinado intervalo de tempo. Um impulso pode ser observado graficamente, numa representação de amplitude em função do tempo. No caso da **Figura 1. 3** está representado um impulso acústico medido utilizando um hidrofone piezoelétrico. Os hidrofones são transdutores da perturbação do meio (onda acústica) em sinal elétrico, permitindo assim, a medição dessa perturbação. A amplitude da perturbação no meio é medida em Volts em função do tempo. A conversão de Volts para unidades de pressão é efectuada de acordo com as especificações do hidrofone. Este tema será desenvolvido com maior detalhe no **Capítulo 2: Conversão Electroacústica**.

A partir desta medição é possível determinar a **pressão de pico**, que corresponde ao valor máximo de pressão observado durante um intervalo de tempo (sendo o pico positivo de compressão e o pico negativo de rarefação); a **pressão pico-a-pico**, que corresponde à soma do pico positivo e do pico negativo em módulo durante um intervalo de tempo; a **pressão RMS** (*root mean square*), ou o valor quadrático médio da pressão durante um intervalo de tempo. Esta ultima, pode ser definida algebricamente da seguinte forma:

$$p_{rms} = \left\{ \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} p(t)^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}}$$

(1. 10)



Onde  $p$  é a pressão acústica e  $t_1$ ,  $t_2$  correspondem ao início e fim do intervalo de tempo em que o valor médio é analisado, geralmente o tempo de duração do impulso (**Figura 1. 3**).

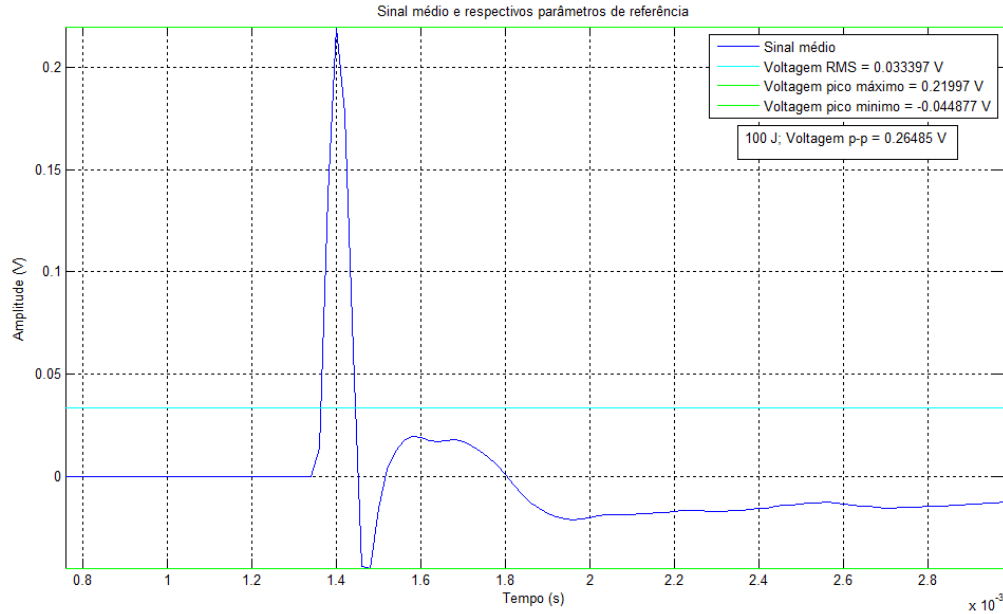


Figura 1. 3 - Esquema de representação de um impulso acústico em amplitude (V) vs tempo (s) e respectivas amplitudes de pico máximo, mínimo e RMS.

Como indicador do conteúdo de energia da onda de pressão, define-se a **exposição acústica** (SE – *Sound Exposure*) algebricamente da seguinte forma:

$$SE = \int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt \quad (1.11)$$

Este parâmetro exprime-se em  $Pa^2.s$ . Esta quantidade é geralmente considerada como um indicador do conteúdo em energia da onda sonora numa janela temporal  $t_1$  e  $t_2$ , onde está contido o comprimento do impulso.

A duração do impulso corresponderá ao tempo durante o qual uma determinada percentagem de energia é considerada e é expresso em segundos. Referindo-se a medições de ruído acústico, Robinson, et al. (2014), consideram que o valor típico de percentagem de energia é de 90 %, ou seja, o intervalo sobre o qual a curva da energia do impulso aumenta de 5 % a 95 % da energia total. Zykov, (2013) na determinação da exposição acústica considera a duração total do impulso, portanto, 100 % da energia. Simpkin (2005) considera o comprimento do impulso primário como o intervalo de tempo

entre o início do impulso  $t_0$  e a primeira passagem por zero ( $t_1$ ). No âmbito deste trabalho, a medição do comprimento do impulso será feita de acordo com a **Figura 1.4** entre  $t_0$  e  $t_2$ .

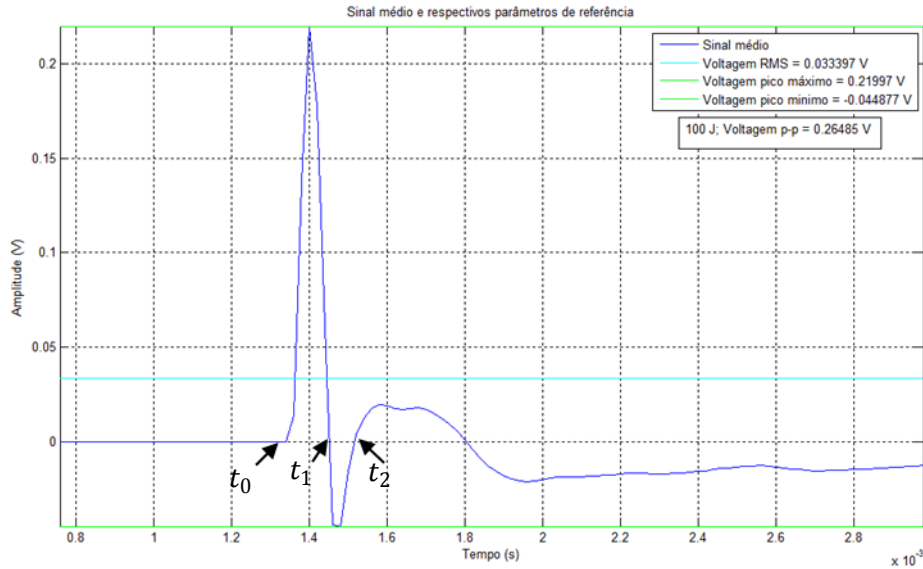


Figura 1.4 - Esquema de representação do impulso acústico da **Figura 1.3** e respectiva delimitação do comprimento do impulso.

### 1.2.3 Níveis em Decibéis: Notação Logarítmica

Em acústica submarina é comum lidar com uma elevada gama de valores, tornando-se conveniente exprimir estes valores na forma logarítmica, portanto decibéis. Estes valores são expressos como níveis, ou seja, correspondem a uma magnitude de uma quantidade relativamente a um valor de referência. 1 Decibel (dB) corresponde a 1/10 de Bel. Sendo um nível de energia definido como (Lurton, 2008):

$$Nível\ de\ Energia_{dB} = 10 \log \left( \frac{E}{E_{ref}} \right)$$

(1.12)

Em que  $E$  corresponde a uma quantidade de energia e  $E_{ref}$  o seu valor de referência.

Como a energia é proporcional ao quadrado da amplitude o nível de amplitude pode ser definido como:

$$Nível\ de\ Amplitude_{dB} = 20 \log \left( \frac{A}{A_{ref}} \right)$$

(1.13)

Em que  $A$  corresponde ao valor de amplitude e  $A_{ref}$  o seu valor de referência.

A pressão de referência utilizada em acústica submarina é o microPascal ( $p_{ref} = 1\mu Pa$ ). O nível de referência para os hidrofones é de  $1 V/\mu Pa$  e para o ouvido humano é de  $20 \mu Pa$  (BIPM, 2017).

### 1.2.4 Intensidade e potência

A energia acústica associada à propagação de uma onda sonora pode ser decomposta em duas partes: energia cinética, associada ao movimento das partículas; e energia potencial, associada ao trabalho efectuado pela força elástica. A **intensidade** define-se como sendo o fluxo médio de energia por unidade de superfície e tempo, podendo ser representada algebricamente pela equação seguinte (Lurton, 2008):

$$I = \frac{p_{rms}^2}{\rho c} \quad (W/m^2)$$

(1. 14)

A **potência acústica** é definida como a intensidade acústica distribuída por determinada superfície ( $S$ ), sendo representada por (Lurton, 2008):

$$P = I \times S = \frac{p_{rms}^2 S}{\rho c} \quad (W)$$

(1. 15)

O **Nível de Pressão Acústica** (em anglo-saxónico, *Sound Pressure Level* – **SPL**) é definido como a intensidade expressa em termos de amplitude média da pressão relativamente à pressão de referência e é definido de acordo com a equação (1. 16):

$$SPL = 10 \log \left( \frac{p^2}{p_{ref}^2} \right) = 20 \log \left( \frac{p}{1\mu Pa} \right) \quad (dB \text{ re } 1\mu Pa)$$

(1. 16)

A intensidade do sinal emitido é o SPL determinado a 1 m de distância da fonte de transmissão acústica e designa-se **Nível da Fonte** (em anglo-saxónico, *Source Level* - **SL**) e é expresso em  $dB \text{ re } 1\mu Pa @ 1m$ . Este parâmetro é uma característica da fonte e deve ser medido no campo distante da fonte, em determinada direcção, sendo utilizado um modelo de propagação adequado de forma a relacionar esse valor com a distância de referência de 1 m. O modelo de propagação deverá considerar os efeitos de perda de energia na propagação da onda acústica (Robinson, et al., 2014). Este tema será desenvolvido nos pontos seguintes.

### 1.2.5 Efeitos de atenuação

Os principais efeitos de atenuação de um impulso acústico durante a sua propagação são: divergência esférica e absorção.

#### 1.2.5.1 Divergência Esférica

Considere-se o caso simples de uma onda esférica gerada a partir de uma fonte pontual, que se propaga em meio homogêneo e infinito. Conforme representado na **Figura 1. 5**, de acordo com a Lei da Conservação da Energia, a energia da frente de onda que atravessa a superfície esférica de raio  $R_0$  é igual à que atravessa a superfície esférica de raio  $R_1$ . Os vectores  $i_0$  e  $i_1$  são as intensidades em  $R_0$  e  $R_1$ . Então podemos afirmar a seguinte igualdade:

$$4\pi i_1 R_1^2 = 4\pi i_0 R_0^2$$

(1. 17)

Resolvendo de forma a determinar a intensidade em  $R_1$ , obtemos:

$$i_1 = \frac{i_0 R_0^2}{R_1^2}$$

(1. 18)

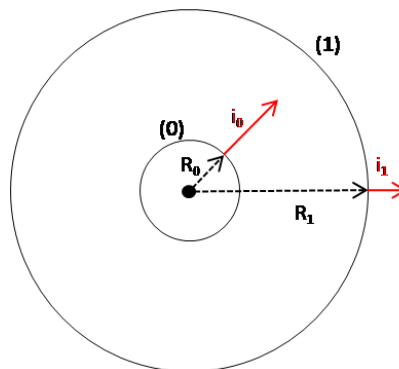


Figura 1. 5 - Esquema representativo da propagação de uma frente de onda a partir de uma fonte acústica pontual. Sendo  $R_0$  e  $R_1$ , as distâncias radiais da fonte e  $i_0$  e  $i_1$  os vectores que representam intensidade.

Este resultado é equivalente a dizer-se que, de acordo com a Lei da Conservação da Energia, a diminuição da intensidade acústica entre os pontos 0 e 1 (**Figura 1. 5**) é inversamente proporcional à relação entre as superfícies  $E_0$  e  $E_1$  das esferas:

$$\frac{i_1}{i_0} = \frac{E_0}{E_1} = \frac{4\pi R_0^2}{4\pi R_1^2} = \left(\frac{R_0}{R_1}\right)^2$$

(1. 19)

Portanto, segundo a equação (1. 19) conclui-se que a intensidade diminui  $1/R^2$  devido ao efeito de divergência esférica. A intensidade acústica é proporcional ao quadrado da pressão e, esta última, diminui  $1/R$  para uma onda esférica (Medwin & Clay, 1998).

A **perda de transmissão** (em anglo saxónico *Transmission Loss* - **TL**), devido a efeitos de divergência esférica, é expresso em decibéis, considerando um raio unitário de referência<sup>c</sup> ( $R_{1m} = 1 \text{ m}$ ), da seguinte forma (Lurton, 2008):

$$TL = 20 \log \left( \frac{R}{R_{1m}} \right) = 20 \log R$$

(1. 20)

### 1.2.5.2 Efeitos de Absorção

A absorção de energia da onda pelo meio, ocorre por razões directamente relacionadas com as características do meio e da frequência transmitida nesse meio. A energia é dissipada devido à viscosidade do meio e às reacções químicas que possam ocorrer (Medwin & Clay, 1998).

Considerando os processos de relaxação descritos no **ANEXO IV: Efeitos de Absorção**, o modelo apresentado por François & Garrison (1982) para a determinação do parâmetro de absorção é escrito da seguinte forma:

$$\alpha = \frac{A_1 P_1 f_1 f^2}{f_1^2 + f^2} + \frac{A_2 P_2 f_1 f^2}{f_2^2 + f^2} + A_3 P_3 f^2 \quad \text{dB/km}$$

(1. 21)

A frequência  $f$  é expressa em kHz. Os dois primeiros termos representam a contribuição dos dois processos de relaxação descritos (o primeiro para o ácido bórico e o segundo para o sulfato de magnésio) e o terceiro termo é referente à contribuição da absorção em água pura (**Figura 1. 6**). A contribuição da pressão é dada por  $P_1$  e  $P_2$  e as frequências de relaxação são representadas por  $f_1$  e  $f_2$ .

<sup>c</sup> Geralmente não se remete à distância de referência de 1 m, por conveniência.

Os parâmetros  $A_1$ ,  $A_2$  e  $A_3$  variam de acordo com as propriedades da água. No **ANEXO IV: Efeitos de Absorção**, estão descritas as equações para determinação dos parâmetros  $A_1$  e  $A_2$ .

O parâmetro  $A_3$ , relativo ao termo da absorção em água pura, varia com a temperatura e foi determinado por François & Garrison (1982).

Para  $T \leq 20^\circ\text{C}$ :

$$A_3 = 4.97 \times 10^{-4} - 2.59 \times 10^{-5}T + 9.11 \times 10^{-7}T^2 - 1.50 \times 10^{-8}T^3, \quad \text{dB km}^{-1} \text{kHz}^{-2} \quad (1.22)$$

Para  $T > 20^\circ\text{C}$

$$A_3 = 3.964 \times 10^{-4} - 1.146 \times 10^{-5}T + 1.45 \times 10^{-7}T^2 - 6.5 \times 10^{-10}T^3, \quad \text{dB km}^{-1} \text{kHz}^{-2} \quad (1.23)$$

François & Garrison (1982) considerando a aproximação de que 1 atm é equivalente a 10 m de profundidade no oceano, o efeito da pressão em água pura é dada pela equação (1.24):

$$P_3 = 1 - 3.83 \times 10^{-5}D + 4.9 \times 10^{-10}D^2 \quad (1.24)$$

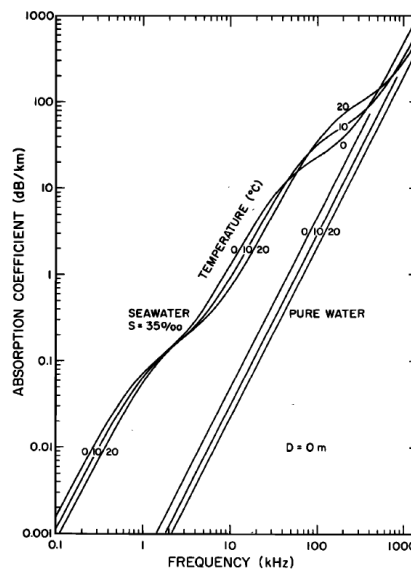


Figura 1. 6 - Absorção em água salgada (pH 8, Salinidade  $35 \text{ }^0/_{00}^d$ ) determinada de acordo com a equação de François & Garrison (1982) a três temperaturas ( $^\circ\text{C}$ ) e para frequências entre 100 Hz e 1 MHz. Estão também representadas as contribuições da água pura nas três temperaturas (François & Garrison, 1982).

<sup>d</sup> Salinidade com apresentação de unidades em partes por mil de acordo com a publicação de François & Garrison (1982).

Os autores (Kinsler, et al. 1982), utilizando a um outro modelo de aproximação publicaram uma curva que relaciona a distância ( $R$ ) com a perda na transmissão ( $TL$ ) para diferentes frequências. Observaram que para frequências baixas e distâncias menores a perda na transmissão dá-se principalmente devido a efeitos de divergência esférica, e à medida que a frequência e distância aumentam a absorção passa a ser significativa (**Figura 1. 7**).

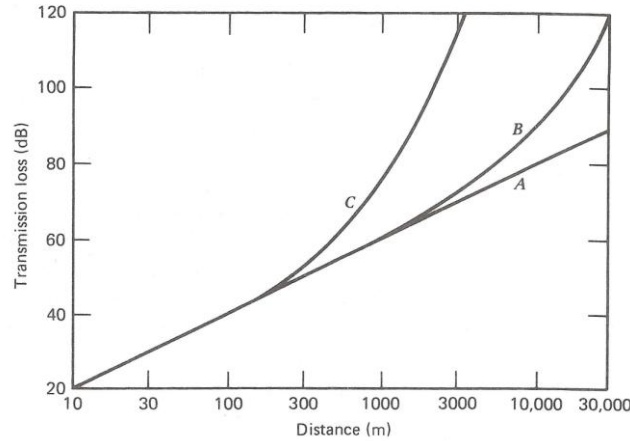


Figura 1. 7 - Relação entre perda na transmissão (**Transmission Loss**), por divergência esférica e absorção, e a distância (**Distance**). A curva **A** representa a frequência de 1 kHz, **B** a 10 kHz e **C** a 50 kHz (Kinsler, et al., 1982; Pp 399). Note-se que em A apenas domina a divergência esférica, ou seja, para frequências de 1 kHz, são necessárias distâncias superiores às determinadas neste gráfico, para observar o efeito da absorção.

A atenuação total, para avaliação dos sistemas acústicos, pode ser expressa pela soma de todos os efeitos descritos anteriormente. A perda na transmissão será portanto a soma das perdas por divergência esférica (componente geométrica) e das perdas por absorção, desprezando efeitos de reflexão, refração e difração:

$$TL = TL(geom) + TL(abs)$$

(1. 25)

Resumidamente, podemos considerar para efeitos práticos a seguinte equação:

$$TL = 20 \log R + \alpha R$$

(1. 26)

A perda na transmissão vem expressa em  $dB/m$  ou  $dB/km$ .

### 1.2.6 Velocidade do som

A velocidade do som na água depende também da temperatura, salinidade e pressão hidrostática, pelo que, poderá ser aproximada por uma equação simples (Medwin, 1975):

$$c \approx 1449.2 + 4.6T - 5.5 \times 10^{-2}T^2 + 2.9 \times 10^{-4}T^3 + (1.34 - 10^{-2}T)(S - 35) + 1.6 \times 10^{-2}D$$

(1. 27)

Sendo,  $c$  a velocidade em  $m/s$  e os parâmetros  $T, S$  e  $D$  entre os seguintes intervalos, e respectivas unidades:

- Temperatura:  $0 \leq T \leq 35^\circ\text{C}$ ;
- Salinidade<sup>e</sup>:  $0 \leq S \leq 45 \text{ } ^\circ/_{00}$ ;
- Profundidade:  $0 \leq D \leq 1000m$ .

### 1.2.7 Aproximação à onda plana

Consideremos uma onda esférica contínua sinusoidal em propagação, cuja representação algébrica por Medwin & Clay (1998) é a seguinte:

$$p = \frac{P_0 R_0}{R} \text{sen}(\omega t - kR) \quad (1.28)$$

Em que  $k$  é o número de onda,  $\omega$  a frequência angular e  $c$  a velocidade do som. A amplitude da oscilação de pressão à distância de referência  $R_0$  é  $P_0$ .

Observa-se que existe um termo temporal,  $\text{sen}(\omega t)$ , e um termo espacial  $\cdot (1/R) \text{sen}(kR)$ . Este último, tal como já foi mencionado no **Capítulo 1.2.5.1 Divergência Esférica**, mostra a diminuição da pressão com o aumento da distância  $R$  numa razão de  $1/R$ .

Considere-se o esquema da **Figura 1.8** para determinar a distância a partir da qual a onda esférica se considera a onda plana ( $W$ ).

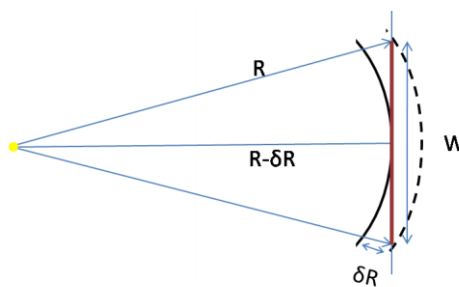


Figura 1.8 - Esquema geométrico para a aproximação da onda plana.

Aplicando o teorema de Pitágoras, podemos obter a seguinte relação:

$$R^2 = (R - \delta R)^2 + \left(\frac{W}{2}\right)^2 \quad (1.29)$$

<sup>e</sup> Salinidade com apresentação de unidades em partes por mil de acordo com a publicação de Medwin (1975).



Resolvendo em ordem a  $\delta R$ , sendo  $\delta R \ll R$ , obtemos a seguinte igualdade:

$$\delta R \approx \frac{W^2}{8R}$$

(1. 30)

Naquela região do arco de circunferência, segundo os autores Medwin & Clay (1998),  $\delta R \leq \lambda/8$ , para a onda plana, então temos:

$$\delta R \approx \frac{W^2}{8R} \leq \frac{\lambda}{8}$$

(1. 31)

Logo, a aproximação para a onda plana ( $W$ ) corresponderá a:

$$W \leq (\lambda R)^{1/2}$$

(1. 32)

#### 1.2.7.1 Campo próximo (Distância de Fresnel) e Campo Distante

Considere-se novamente o esquema da **Figura 1. 8**, em que  $W$  representa agora a dimensão de um transdutor que gera uma onda acústica. O transdutor (fonte não pontual, podendo ser em forma disco), contribui para a geração da onda acústica a partir de diferentes pontos da sua superfície, podemos assumir que existem na face do transdutor uma série de fontes pontuais. Em qualquer local da zona do **campo próximo**, essas fontes pontuais encontram-se em fases diferentes. A resultante destas interferências é um campo que oscila com a distância, e a sua intensidade média diminui mais lentamente do que a divergência esférica (Lurton, 2008). A transição entre o **campo próximo** para o **campo distante** (ou **distância de Fresnel**) é definida pela distância da fonte a partir da qual todas as contribuições dos diferentes pontos do transdutor são construtivas e portanto, a amplitude da onda não oscila, embora decresça uniformemente a partir dessa distância. Na zona do **campo distante**, as ondas estão em fase e a intensidade decresce  $1/R^2$ , de acordo com a divergência esférica (Lurton, 2008). A **Figura 1. 9** ilustra um exemplo, a partir de uma fonte em forma de disco, onde é possível observar o campo próximo (*Near Field*), distância de Fresnel (*Fresnel Distance*) e campo distante (*Far Field*).

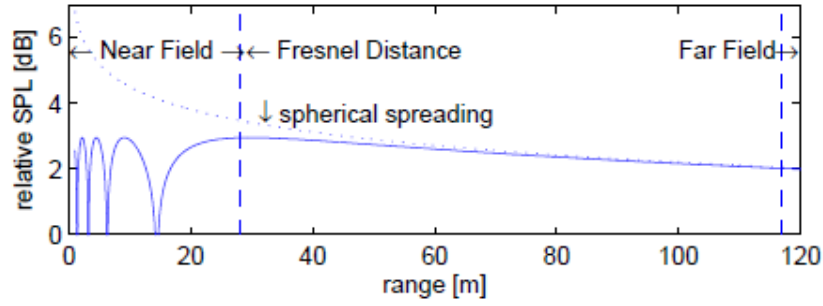


Figura 1. 9 - Nível de pressão da fonte (*relative SPL*) vs distância (*range*), para uma fonte em forma de pistão circular com raio de 6 m, frequência de 1,2 kHz. *Near Field*: campo próximo; *Fresnel Distance*: distância de Fresnel; *Far Field*: campo distante; *spherical spreading*: divergência esférica (Erbe, 2011).

Consideremos agora novamente o esquema da **Figura 1. 8**.  $W$  é a dimensão de um transdutor (podendo corresponder ao diâmetro de um disco) que transmite um sinal de comprimento de onda  $\lambda$ . Segundo Lurton (2008) a distância de Fresnel pode ser determinada considerando a diferença entre percursos de propagação da onda, entre a parte central do transdutor e a periferia ( $\delta R$ ). Para efeitos de simplificação, consideremos  $R - \delta R = x$  e que  $x \gg W$ , então obtemos:

$$\delta R = R - x = \sqrt{x^2 + \left(\frac{W}{2}\right)^2} - x \approx \frac{W^2}{8x} \quad (1.33)$$

As interferências referidas anteriormente deixam de ocorrer quando a porção de energia que chega ao receptor se encontra dentro do primeiro meio ciclo. Então  $\delta R$  terá que ser maior ou igual a metade do comprimento de onda na distância de Fresnel:

$$\frac{W^2}{8x} \geq \frac{\lambda}{2} \Leftrightarrow x \leq \frac{W^2}{4\lambda} \quad (1.34)$$

Então o limite do campo próximo será ( $D_{fresnel}$ ):

$$D_{fresnel} \leq \frac{W^2}{4\lambda} \quad (1.35)$$

Segundo Lurton (2008), esta distância ainda não permite a diminuição da amplitude com o inverso da distância, ou seja, não se encontra ainda no campo distante. Considera-se que a onda se

propaga em fase quando as contribuições de todos os pontos do transdutor se encontram com diferença de fase de  $\frac{\pi}{4}$ , ou seja, quando o comprimento de onda é  $\frac{\lambda}{8}$ , portanto:

$$\frac{W^2}{8x} \leq \frac{\lambda}{8} \Leftrightarrow x \geq \frac{W^2}{\lambda}$$

(1. 36)

Então, a distância ( $D_{cd}$ ) para a qual a condição de campo distante se verifica é dada por:

$$D_{cd} \approx \frac{W^2}{\lambda}$$

(1. 37)

Estas definições algébricas são aplicáveis também para um transdutor receptor de dimensão  $W$  (Lurton, 2008).

Para um pistão circular rodeado por um deflector rígido gerando uma excitação sinusoidal suficientemente longa para permitir que os efeitos transientes sejam dissipados (impulso), o limite entre o campo próximo e distante é definido por (Medwin & Clay, 1998; Simpkin, 2005):

$$R_c = \frac{\pi a^2}{\lambda}$$

(1. 38)

Em que  $R_c$  corresponde à distância de Fresnel do pistão,  $a$  é o raio do pistão e  $\lambda$  o comprimento de onda do impulso. Para distâncias aproximadamente superiores a  $3 \times R_c$ , apenas a amplitude muda com o aumento da distância e não a forma do impulso, considera-se portanto, que as condições de campo distante são cumpridas (Simpkin, 2005). Esta equação não se sustenta para excitação de banda larga, já que uma gama de frequências e portanto, uma gama de comprimentos de onda, contribuem para formar o impulso (Simpkin, 2005).

Simpkin (2005) determinou, empiricamente, a distância para a fronteira entre o campo próximo e o campo distante, para um pistão de 50 cm de raio e comprimento de impulso 120  $\mu$ s:

$$R_c \approx \frac{a^2}{1.2cT_p}$$

(1. 39)

Em que  $c$  é a velocidade do som na água e  $T_p$  é a largura do impulso definida como a distância em tempo entre o início do impulso e a primeira passagem por zero. No mesmo trabalho, Simpkin (2005) sugere que a banda passante do impulso (considerada como a frequência mais alta para a qual se tem uma atenuação de -6dB em relação ao valor máximo),  $W_{-6}$ , está relacionada com a largura do pulso  $T_p$  definida acima pela expressão:  $W_{-6} \sim 1/T_p$ .

## Capítulo 2: Conversão Electroacústica

Para a detecção e análise de perturbações de pressão na água são utilizados transdutores electroacústicos, ou seja, que convertem energia acústica em energia eléctrica e vice-versa. Quando o transdutor converte energia acústica em energia eléctrica denomina-se hidrofone, ou seja é um receptor, ao contrário é uma fonte acústica e é um transmissor.

### 2.1 Conversão Analógico para Digital

A onda acústica recebida no hidrofone é um sinal contínuo que produz uma variação de voltagem ao longo do tempo, esta variação contínua de amplitude no tempo é um sinal analógico. Para que seja possível processar esse sinal num computador é necessário convertê-lo num sinal discreto (sinal digital). A digitalização, é realizada por um conversor analógico/digital (ADC – *Analog to Digital Converter*) e envolve o processo de amostragem e de discretização. Primeiro, o sinal é amostrado em intervalos regulares, sendo definido um intervalo de amostragem para esse efeito e, seguidamente, é dado um valor discreto a cada amostra que traduz a amplitude do sinal digitalizado (Matias & Costa, 2011).

#### 2.1.1 Amostragem

O sinal analógico é amostrado num determinado intervalo de tempo ( $\Delta t$ ), sendo a frequência de amostragem ( $f_a$ ) o inverso desse intervalo de tempo ( $f_a = 1/\Delta t$ ). A frequência e a amostragem determinam a periodicidade em que ocorre a conversão A/D (analógico/digital). Se a periodicidade da amostragem for muito lenta o sinal poderá ser representado de forma errada. Veja-se o exemplo da **Figura 2. 1** onde se pode observar o fenómeno descrito. Quando a amostragem é insuficiente para a frequência de um determinado sinal ocorre perda de informação e denomina-se por **falseamento** (em Inglês é denominado de *aliasing*).

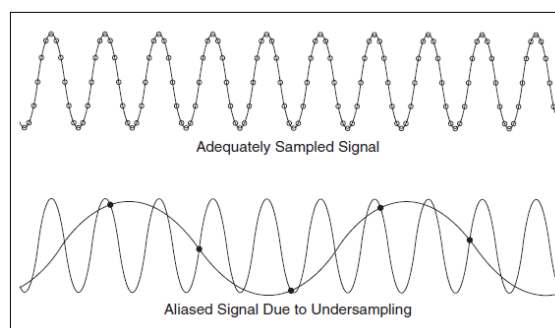


Figura 2. 1 - Dois exemplos de amostragem. Em cima o sinal é bem amostrado e a representação através da sequência de amostras é muito próxima do sinal analógico. Em baixo o sinal tem uma taxa de amostragem muito lenta relativamente à frequência do sinal analógico. Esta representação está falseada. As amostras estão representadas pelos pontos. (NI, 2004).

De forma a evitar a má representação do sinal, o **Teorema da amostragem** indica que a frequência de amostragem deverá ser o dobro da componente máxima de frequência do sinal amostrado. Para uma dada frequência de amostragem, a **frequência de Nyquist** ( $f_N$ ) é a frequência máxima que poderá representar com precisão e sem falseamento um determinado sinal, e corresponde a metade da frequência de amostragem ( $f_N = f_a/2$ ).

Qualquer energia presente acima de metade da frequência de amostragem vai-se sobrepor ao sinal, essa energia pode não ser o sinal emitido pela fonte acústica mas sim ruído ambiente. De forma a evitar que estas componentes adicionais falseiem o sinal, deve ser aplicado um filtro passa-baixo (**Filtro antifalseamento**) para cortar todo o ruído de maior frequência, antes da entrada do sinal no conversor A/D.

A frequência de Nyquist é apenas um critério de preservação da informação (do conteúdo em frequência). A frequência de amostragem deve ser superior para permitir uma representação mais precisa do sinal mas não pode ser exageradamente grande sob risco de criação de ficheiros que ocupam demasiado espaço em disco e cujo processamento é lento. McGee (2000) indica que a **sobre-amostragem** é adequada para sinais acústicos, uma vez que este método promove o aumento de resolução e evita falseamento do sinal. Outra razão para definir a frequência de amostragem como sendo maior do que o dobro da frequência máxima presente no sinal, é que os diferentes filtros passa-baixo usados para evitar falseamento (chebyshev, butterworth, bessel, etc.), não são perfeitos, isto é, não definem uma janela rectangular (Smith, 1999). Como tal, os filtros introduzem algum ruído e deve haver alguma margem entre a frequência de filtragem e a frequência máxima do sinal.

### 2.1.2 Domínio da frequência

A representação do sinal no domínio do tempo permite descrever as amplitudes do sinal nos instantes de tempo durante o qual foi amostrado. No entanto, em diversos casos é de interesse saber o conteúdo em frequência de um sinal em vez da amplitude das amostras individuais. O **Teorema de Fourier** afirma que qualquer forma de onda no domínio do tempo pode ser representada pela soma ponderada de senos e co-senos. A mesma forma de onda pode depois ser representada no **domínio da frequência** como um par de valores de amplitude e fase de cada componente de frequência individual.

O conceito da **transformada de Fourier** é baseado na série de Fourier que exprime qualquer função (tal como um sinal em tempo de comprimento limitado) como o somatório de uma série infinita de tempo de ondas seno e co-seno. A série de Fourier é expressa em termos de coeficientes de amplitude e valores de fase para cada um dos termos harmónicos (múltiplos da frequência fundamental) (Dobrin & Savit, 1988). Todas as harmónicas da frequência fundamental são separadas por elementos infinitesimais e a série de Fourier, que consiste em amplitudes e fases para as harmónicas sucessivas, torna-se uma função contínua. A expressão matemática da transformada de Fourier para obter o espectro de frequência,  $F(n)$ , em função do tempo,  $f(t)$ , é a seguinte:

$$F(n) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i2\pi t} dt$$

(2. 1)

Este integral tem termo real e imaginário (coeficiente i). É obtida uma magnitude e ângulo de fase (proporcional ao atraso em tempo) para cada frequência. Obtém-se uma função simétrica, pois na

integração entre  $-\infty$  e  $+\infty$  cada produto positivo da lado direito do eixo das abcissas é cancelado por um produto negativo igual do lado esquerdo (Dobrin & Savit, 1988).

A equação (2. 1) é aplicável a sinais contínuos. No entanto, é do interesse deste trabalho aplicar este Teorema a sinais digitalizados. Para tal utiliza-se a **Transformada Discreta de Fourier (DFT)**. A DFT estabelece a relação entre as amostras de um sinal no domínio do tempo e a sua representação no domínio da frequência. Supondo que se obtiveram  $N$  amostras de um sinal  $x(i)$  com um intervalo de amostragem  $\Delta t$ , a DFT é determinada da seguinte forma:

$$X[k] = \sum_{i=0}^{N-1} x(i) e^{-j2\pi ik/N} \quad \text{para } k = 0, 1, 2 \dots N - 1$$

(2. 2)

Existe também uma ambiguidade no **domínio da frequência**, com sinais discretos, que não existe em sinais contínuos. Como já foi referido, uma sequência de valores gravada no computador não pode representar, sem qualquer ambiguidade, apenas uma sinusoidal, representa um número infinito de diferentes sinusóides, logo, o espectro de uma série de amostras discretas contém replicações periódicas do espectro original contínuo (Lyons, 2004). O espectro obtido através da DFT na prática corresponde a fazer uma amostragem do espectro contínuo do sinal. No domínio da frequência quando o espectro é não nulo para frequências superiores à frequência de Nyquist, então, o espectro da função amostrada fica incorrectamente representado devido à sobreposição (Matias & Costa, 2011). Se metade da frequência de amostragem for menor que a frequência máxima presente no sinal as replicas espectrais sobrepõem-se e já não é possível reconstituir o sinal original. Posto isto, a frequência de amostragem deverá ser sempre superior ao dobro da frequência de Nyquist, e portanto da frequência máxima presente no sinal ( $f_a \geq 2f_N$ ).

### 2.1.3 Discretização

A unidade básica de armazenamento de informação num sistema digital é o bit (*binary digit*), que só pode assumir dois valores: 1 ou 0, verdadeiro ou falso. Estes valores são gravados na memória do computador sendo limitados pelo número de bits disponíveis. O número de estados possíveis (geralmente denominado por *counts* –  $N$ ) para registar a amplitude do sinal, é representado por um dado número de bits da seguinte forma:

$$N = 2^{n^{\circ} \text{ de bits}}$$

(2. 3)

A partir do número de estados possíveis que o computador pode assumir, é necessário saber quais os limites do sistema no que respeita a valores máximos e mínimos de tensão, estabelecendo assim valores máximos e mínimos admitidos pelo sistema para, numa amostragem, ser possível

discretizar valores de amplitude. Estes valores são definidos no sistema ADC, sendo a sua capacidade mínima de discretização ou **unidade de contagem** ( $\delta V$ ):

$$\delta V = \frac{V_{m\acute{a}x}}{N} \quad (V/count)$$

(2. 4)

Sendo  $V_{m\acute{a}x}$  a capacidade máxima da janela de amplitude do sistema ADC, em Volts.

A **dinâmica de amostragem** de um sistema (*Dynamic Range* em Inglês), corresponde à gama de amplitudes que o sistema consegue medir de forma confiável. Esta gama vai desde ruído de base do sistema ( $\delta V$ ) até ao valor de amplitude mais elevado do sinal mensurável sem distorção significativa.

A dinâmica de amostragem do sistema corresponde à seguinte relação entre valores máximo e mínimo:

$$Dr = 20 \log \left( \frac{V_{m\acute{a}x}}{\delta V} \right) = 20 \log \left( \frac{N}{1} \right) = 6.02 \times n^{\circ} de bits \quad (dB)$$

(2. 5)

A dinâmica de amostragem deverá ser suficiente para permitir registar o sinal mais elevado expectável com fiabilidade e sem distorção ou saturação, causada pelo hidrofone, amplificador e ADC (Robinson, Lepper, & Hazelwood, 2014).

Deve ter-se em atenção que se a amplitude do sinal em voltagem for muito maior do que a amplitude limite em voltagem da carta ADC, a carta pode ser queimada. Há assim necessidade de condicionamento de sinal antes da digitalização. Não há grande risco da carta ser danificada porque a intensidade do sinal proveniente dos hidrofones é relativamente baixa e não ultrapassa a janela de amplitude máxima. No entanto, se o sinal ultrapassar a janela, mesmo que pouco, ocorre saturação do sinal (*clipping* em Inglês) e perde-se informação que não é recuperável, tal como se pode observar no exemplo da **Figura 2. 2**.

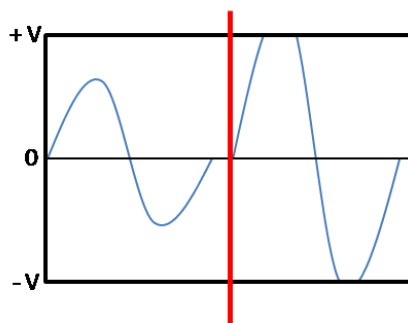


Figura 2. 2 - Representação gráfica de um sinal sinusoidal em função do tempo, onde se observa um exemplo de sinal com *clipping* (à direita do risco vermelho). Numa situação ideal a amplitude ocupa cerca de 80% da janela de digitalização (à esquerda do risco vermelho).

Quando o sinal proveniente dos hidrofones é de muito baixa amplitude, aplica-se uma amplificação à tensão recebida. Essa amplificação denomina-se **ganho** e corresponde à multiplicação da tensão por um factor em decibéis.



Dá-se seguidamente um exemplo considerando a carta NATIONAL INSTRUMENTS DAQ USB-6251 (janela de amplitude máxima de -10 V a +10 V, 16 bits). Nesta carta,  $V_{máx}$  é 20 V e podem ser assumidos 65536 estados entre -32767 e -32768 *counts* com 0,305 mV unidades de contagem e uma dinâmica de amostragem de 96 dB.

## 2.2 Características Fundamentais dos Transdutores

Os transdutores são seleccionados de acordo com o objectivo pretendido (transmissor ou receptor). Existem transdutores que operam como transmissores e receptores, mas neste caso, vamos apenas salientar a utilização de receptores e transmissores separadamente.

Existem características na instrumentação que são transversais e importantes para caracterizar os transdutores: Sensibilidade; Resposta em frequência; Directividade.

### 2.2.1 Sensibilidade

A **sensibilidade**, em acústica submarina, quantifica a conversão electroacústica e corresponde à relação entre os valores de entrada e saída do transdutor. A sensibilidade descreve-se em termos de tensão eléctrica (voltagem) desenvolvida por pascal de pressão acústica. O **nível de sensibilidade** é geralmente expresso em *dB re 1V/1μPa* (Robinson, Lepper, & Hazelwood, 2014).

Na recepção, a sensibilidade é definida através de um parâmetro denominado por Lurton (2008) como resposta em circuito aberto (*Open Circuit Response* – OCR) e é determinada da seguinte forma:

$$OCR = 20 \log \left( \frac{V_{1\mu Pa}}{V_{ref}} \right) \quad (dB \text{ re } 1V/1\mu Pa)$$

(2. 6)

Sendo  $V_{1\mu Pa}$  a voltagem de saída do hidrofone para uma pressão acústica incidente de 1μPa, e  $V_{ref}$  a voltagem de referência (1V). Assim fica definida, em decibéis, qual a resposta do transdutor em voltagem para uma pressão de referência de 1μPa.

A sensibilidade do transdutor varia também com a frequência do sinal acústico emitido ou recebido.

Revedo o conceito de intensidade mencionado no **Capítulo 1.2.4 Intensidade e potência**, o **nível da fonte** ou **SL** (intensidade emitida pela fonte a 1 m de distância) terá em consideração a perda na transmissão e a sensibilidade, e portanto:

$$SL = 20 \log(V) - OCR - G + TL \quad (dB \text{ re } 1\mu Pa @ 1m)$$

(2. 7)

Sendo  $V$  a tensão em voltagem registada do sinal emitido e  $G$  o ganho do amplificador ligado ao hidrofone em  $dB$ .

### 2.2.2 Resposta em frequência

A **resposta em frequência** corresponde à gama de frequências a que um transdutor pode emitir ou receber sinais de forma eficiente<sup>f</sup>. Conforme se pode observar na **Figura 2. 3** à direita, num transmissor, a banda de frequências emitida está contida na zona ressonante (ou seja, na zona de mínimos de impedância) (Au & Hastings, 2008). A **banda de frequências** é definida, convencionalmente, considerando -3 dB de decaimento a partir da frequência central (Lurton, 2008). No caso de um receptor, a banda de frequências definida anteriormente deixa de ter significado. Na **Figura 2. 3** à esquerda, a banda de frequências é mais alargada e a sua melhor resposta encontra-se na zona plana (fora da gama ressonante) que deverá ser extensa o suficiente, de forma a registar fielmente todas as componentes das frequências de interesse do sinal medido.

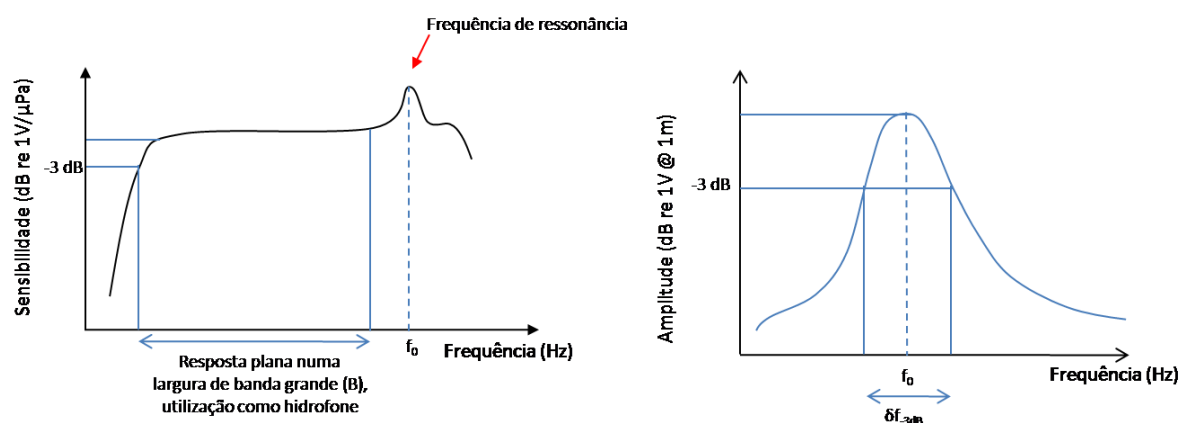


Figura 2. 3 - (À esquerda) Curva típica da resposta em frequência de um hidrofone. A frequência de ressonância  $f_0$  é rejeitada na utilização como receptor, sendo a largura de banda B a área de utilização como receptor. (À direita) Resposta em frequência típica de um transmissor com largura de banda de  $\Delta f_{-3dB}$ .

Num hidrofone, o comportamento ressonante irá distorcer<sup>g</sup> o sinal registado, causando amplificação de componentes de frequência próximos da frequência de ressonância e distorcendo a forma de onda em tempo. É importante que o hidrofone utilizado para medir um sinal acústico tenha frequências de ressonância fora da banda de frequências de interesse do sinal acústico emitido (Robinson, Lepper, & Hazelwood, 2014).

<sup>f</sup> Eficiência no sentido de executar de forma fiel a conversão da energia mecânica (ondas acústicas) em energia eléctrica, no caso de um hidrofone, e vice-versa, para o caso de uma fonte acústica.

<sup>g</sup> Distorção: atenuação e deslocamento de fase de diferentes componentes de frequência de um sinal.

Num transmissor, o **factor mecânico de qualidade** quantifica a banda de frequências relativa na ressonância (Lurton, 2008):

$$Q = \frac{f_0}{\delta f_{-3dB}}$$

(2. 8)

Sendo portanto a relação entre a frequência central e largura de banda do sistema. A largura de banda da curva de ressonância é inversamente proporcional à resistência mecânica do elemento do hidrofone (impedância mecânica). Se a resistência mecânica do elemento é pequena, a curva cai rapidamente e a ressonância é acentuada. Se a resistência mecânica for elevada a curva cai mais lentamente e a ressonância é ampla (Au & Hastings, 2008).

### 2.2.3 Directividade

A **directividade** de um transdutor está relacionada com a distribuição angular da energia acústica no meio. No caso de um projector, a directividade define-se como o padrão de radiação de energia acústica no meio. No caso de um receptor, é definida como a sensibilidade na quantidade de energia recebida em determinada direcção. O **padrão de directividade** indica, portanto, a zona de maior concentração de energia para um projector, e a zona de maior sensibilidade para um receptor. Um hidrofone ideal teria uma resposta omnidireccional se a sua sensibilidade fosse invariante com a direcção da propagação da onda acústica. E uma fonte acústica ideal seria pontual, radiando a energia esfericamente. No entanto, na realidade isso não acontece. Os transdutores apresentam um padrão de directividade que depende da frequência do sinal emitido ou recebido e da estrutura (forma e tamanho) do transdutor.

No caso de uma fonte acústica, o **índice de directividade** quantifica, em decibéis, o aumento da concentração de energia acústica ao longo do seu eixo principal (zona do espaço onde a concentração de energia é maior). No caso de um hidrofone, o índice de directividade, exprime a diminuição de ruído detectável na sua direcção preferencial de recepção, já que naquele eixo principal apresenta melhor sensibilidade. Simplificando, de acordo com RESON (2011), o índice de directividade para uma fonte acústica, determina a quantidade de energia que se encontra concentrada no seu ponto de máxima resposta. Nos hidrofones indica a capacidade para diferenciar o sinal emitido do ruído ambiente.

Para uma fonte pontual a largura do feixe,  $\beta$ , (ângulo de resposta máxima do feixe) é de  $360^\circ$  (feixe esférico) e o índice de directividade é de aproximadamente 0 dB. Para uma fonte em forma de disco a largura do feixe (onde a intensidade diminui 3 dB) é de (RESON, 2011):

$$\beta = \frac{91440}{f_{Hz} \cdot D_{mm}} \quad (^\circ)$$

(2. 9)

Sendo  $f_{Hz}$  a frequência do sinal em Hz e  $D_{mm}$  o diâmetro do disco em mm, com a condição de que o diâmetro seja superior ao comprimento de onda do sinal. A forma do feixe é cônica.

O índice de directividade para uma fonte em forma de disco será dado por (RESON, 2011):

$$DI \approx 10 \log \left( \frac{36000}{\beta^2} \right) \quad (dB)$$

(2. 10)

Na **Figura 2. 4** está ilustrada a variação do índice de directividade e da largura do feixe para uma fonte em forma de disco ( $D_{mm} = 380 \text{ mm}$ ) em função da frequência, de acordo com as equações (2. 9) e (2. 10).

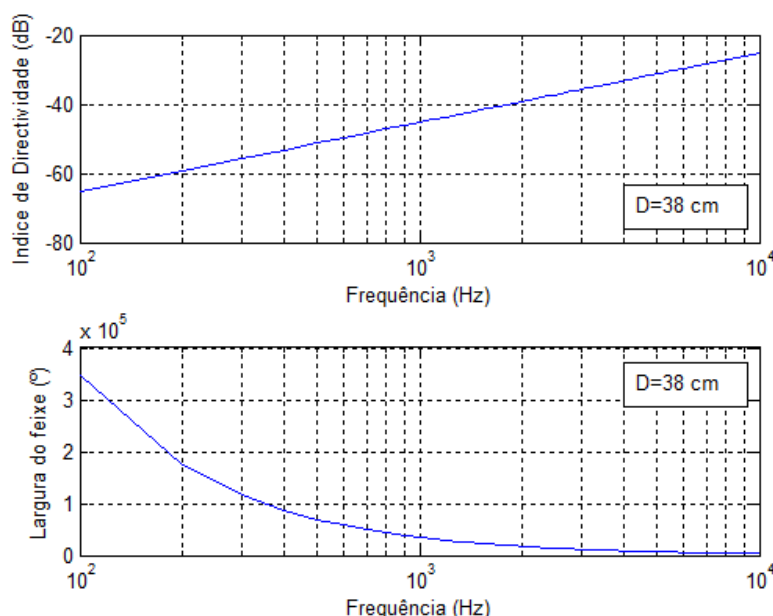


Figura 2. 4 - Variação do índice de directividade (em cima) e largura do feixe (em baixo) para uma fonte em forma de disco com 38 cm de diâmetro, em função da frequência.

Verbeek & McGee (1995) estudaram vários tipos de fontes acústicas focando as suas medições na frequência máxima do sinal transmitido e largura de banda de frequência a -40 dB a partir do espectro de potência. Para uma fonte em forma de disco (placa *boomer* de 50 cm de diâmetro) concluíram que a frequência máxima e largura de banda do sinal, geralmente diminuem à medida que o desvio relativamente ao eixo principal aumenta.

Mais tarde, Simpkin (2005) analisou impulsos gerados por uma fonte em forma de pistão circular rodeado por um deflector rígido (placa tipo *boomer* com diâmetro de 40 cm) e observa que tanto o pico de pressão como a largura de banda, em impulsos no campo distante, decaem com o ângulo relativamente ao eixo principal (**Figura 2. 5**)

A diminuição na largura de banda é um resultado directo do aumento da duração do impulso. Os dados demonstram um o grau de directividade em relação ao eixo principal do pistão sendo, no caso do estudo publicado, uma diferença de -3 dB do pico de amplitude para uma distância de 20° do eixo principal (**Figura 2. 6**).

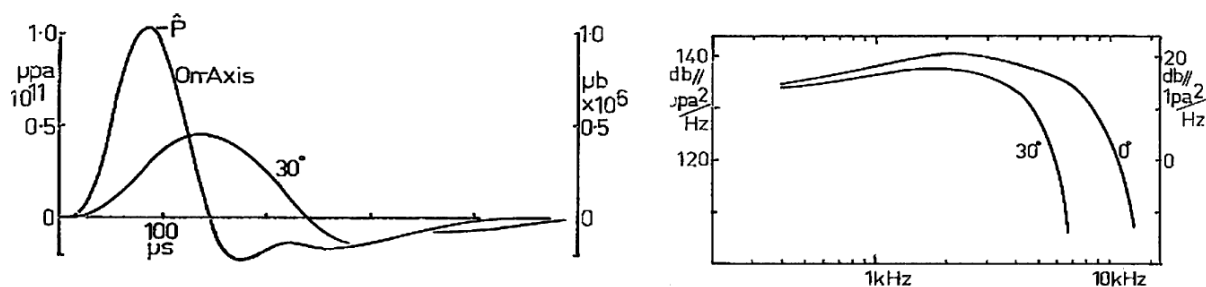


Figura 2. 5 - (esquerda) impulso de uma fonte do tipo *boomer* medido em campo distante no eixo principal e com um desvio de 30° relativamente ao eixo. (direita) Respectivas respostas espectrais (**Simpkin, 2005**).

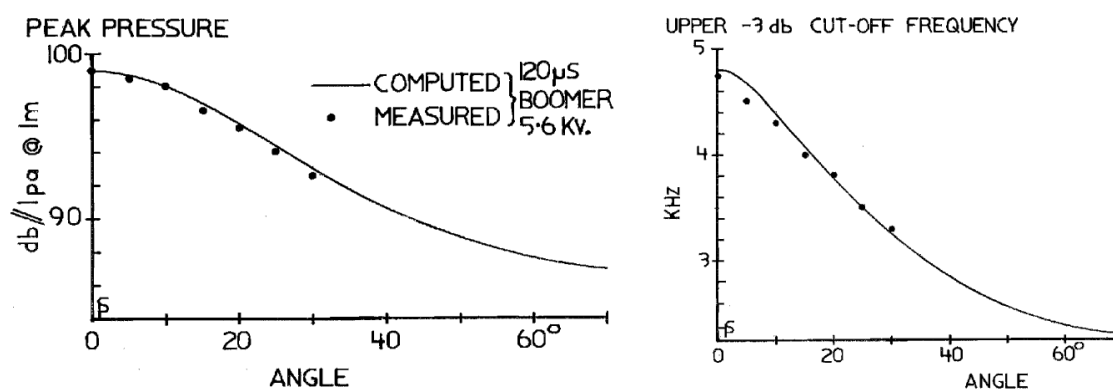


Figura 2. 6 - (esquerda) Pressões de pico do impulso de  $120\mu s$  de uma fonte do tipo *boomer*. (direita) Banda de frequências do impulso de  $120\mu s$  de uma fonte do tipo *boomer*, medidas com atenuação de 3 dB (**Simpkin, 2005**).

## Capítulo 3: Instrumentação e Metodologia

Este capítulo descreve os equipamentos, o local de trabalho e o procedimento utilizado para efectuar as medições necessárias para obtenção dos dados analisados no âmbito deste trabalho.

### 3.1 Tanque Anecóico

Todas as medições foram executadas em ambiente controlado, num tanque coberto e anecóico, ou seja, não produz ecos ou reduz os ecos.

O tanque (**Figura 3. 1**) tem as seguintes dimensões: 5 m de largura, 8 m de comprimento e 5 m de profundidade. Encontra-se preenchido com água doce e toda a área (paredes e superfície) está revestida com placas de material adequado ao isolamento acústico. As placas têm estrutura piramidal que permite uma boa absorção das ondas acústicas nas extremidades do tanque, impedindo assim a sua reflexão.



Figura 3. 1 - O tanque anecóico utilizado nas medições.

O tanque tem um aparelho de força que permite elevar equipamentos mais pesados e colocá-los na posição e profundidade pretendidas. Tem também uma ponte à superfície de um lado ao outro do tanque, em largura, que permite que um operador verifique o estado dos equipamentos quando estes se encontram mergulhados no tanque. Nesse local, é instalado o hidrofone com o auxílio de uma vara que permite controlar a profundidade e a posição do mesmo. É também colocada a fonte acústica à distância e profundidades pretendidas. Essa ponte movimenta-se em comprimento sendo possível controlar a distância entre a fonte acústica e o hidrofone, e entre os transdutores e as paredes do tanque.

## 3.2 Instrumentação

A instrumentação utilizada no âmbito deste trabalho é constituída, principalmente, por uma fonte de aceleração de massa de água como fonte acústica, um sistema piezoelétrico como receptor (hidrofone), e um sistema de conversão analógico para digital. Todas as medições foram efectuadas em ambiente controlado, num tanque isolado acusticamente.

### 3.2.1 Sistema CSP300 e placa *boomer* AA200

Os sinais acústicos são gerados a partir de um sistema constituído por uma fonte de energia CSP300 (**Figura 3. 2**) e uma fonte acústica do tipo *boomer* AA200 (**Figura 3. 3**) da *applied acoustic engineering*.

A fonte de energia denominada por *capacitor charging unit* (CSP), é uma unidade de alimentação de alta tensão, que recarrega os condensadores com a quantidade de energia necessária num intervalo de tempo curto, para gerar o impulso na fonte acústica. Esta fonte tem a capacidade de efectuar descargas de energia até 1050 J/s, sendo esse máximo a limitação dos intervalos entre descargas (AAE, Capacitor Charging Unit, 2002). Por exemplo, para descargas de 200 J por impulso, a frequências das descargas não pode ser superior a 5 impulsos por segundo.

A fonte de energia é conectada à fonte acústica através de um cabo de alta tensão de 50 m de comprimento.

A placa *boomer* AA200 é um sistema electromecânico que gera o impulso acústico por aceleração de massa de água. Esta placa (**Figura 3. 3**) está montada numa estrutura em *catamaran*, que permite manter a horizontalidade e flutuabilidade do equipamento, quando rebocado numa plataforma. A placa tem um diâmetro de 38 cm e pesa 18 kg no ar e 10kg na água (AAE, Sound Source Operating Manual, 2003).



Figura 3. 2 - Fonte de energia APPLIED ACOUSTIC ENGINEERING CSP300P.



Figura 3. 3 - Placa *boomer* APPLIED ACOUSTIC ENGINEERING AA200 montada em *catamaran*.

O sistema consiste numa bobine eléctrica magneticamente acoplada a um disco metálico localizado por trás de um diafragma de borracha. A energia dos condensadores da fonte CSP é descarregada para a bobine gerando correntes de indução na placa que resulta numa resposta mecânica repulsiva. O diafragma de borracha força a placa a voltar à posição inicial após cada repulsão (AAE, Sound Source Operating Manual, 2003) (Hayward & Edgerton, 1964).

Estas descargas de energia, ou disparos da fonte acústica, são efectuadas em intervalos de tempo definidos consoante as limitações dos equipamentos e o objectivo da sua utilização. O ciclo de operação máximo recomendado da placa *boomer* AA200, quando utilizado a reboque numa plataforma em movimento, não deve ultrapassar os 300 J a cada 0,5 s. No caso da operação em modo estático<sup>h</sup>, e portanto, quando utilizado em posição fixa, não deve ultrapassar os 200 J a cada 1,0 s (AAE, Sound Source Operating Manual, 2003).

O fabricante da placa *boomer* fornece informação do impulso expectável em tempo e respectivo espectro de frequências (**Figura 3. 4** e **Figura 3. 5**). Na resposta em tempo, a maior amplitude do sinal, corresponde ao primeiro lançamento da placa para fora a partir da bobine, pelas correntes induzidas (Hayward & Edgerton, 1964). De acordo com a informação gráfica fornecida, um impulso gerado com uma energia de 100 J terá uma duração de  $\approx 160 \mu\text{s}$ , a amplitude pico-a-pico será de  $\approx 1,8 \text{ ua}$ <sup>i</sup> sendo a amplitude máxima de  $\approx 1,4 \text{ ua}$  e a amplitude mínima de  $\approx -0,4 \text{ ua}$  (**Figura 3. 4**). O fabricante define em manual que a duração de um impulso típico é de  $\approx 150 \mu\text{s}$ .

<sup>h</sup> Operação estática em oposição à operação a reboque numa plataforma em movimento. Como o equipamento não se encontra em movimento não ocorre dissipação do calor na água, e poderá ocorrer sobreaquecimento e danificação da estrutura.

<sup>i</sup> ua - unidades arbitrárias.



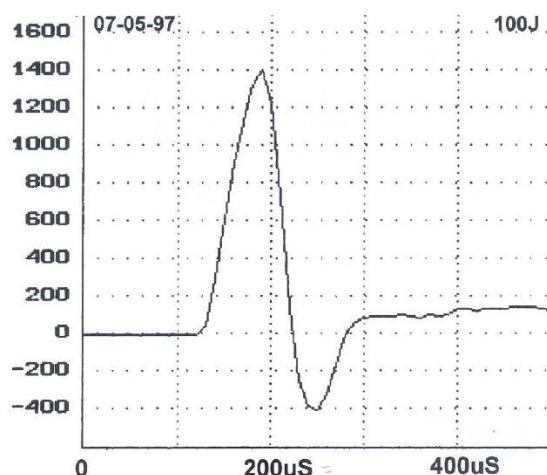


Figura 3.4 - Resposta em tempo típica de um impulso gerado pela placa *boomer* AA200 (AAE, *Sound Source Operating Manual*, 2003).

A resposta espectral típica vem também graficamente representada, e permite inferir que a resposta máxima se encontra na gama de frequências entre 310 Hz e 7235 Hz a -3 dB. Considerando a frequência central de 1000 Hz, obtém-se um factor de qualidade (ver **Capítulo 2.2.2 Resposta em frequência**) de 0,14. Quando a frequência central considerada é de 3950 Hz, o factor de qualidade melhora significativamente para 0,57 (**Figura 3.5**).

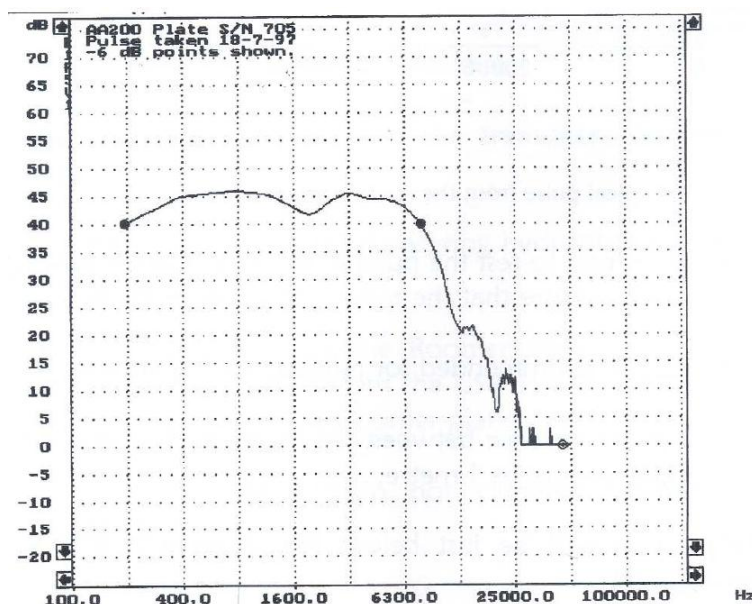


Figura 3.5 - Resposta em frequência do impulso gerado a partir da placa *boomer* AA200. Os pontos representados no gráfico definem uma largura de banda do sistema entre 250 Hz e 9105 Hz a -6 dB (AAE, *Sound Source Operating Manual*, 2003).

De acordo com o fabricante, o nível da fonte (*source level*) para um impulso gerado a 200 J é de 215 dB re 1  $\mu$ Pa @ 1m, embora possa variar de acordo com o tipo e comprimento do cabo eléctrico. No manual da fonte, vem também incluído um parâmetro de reverberação, onde se indica

que o sinal após o primeiro impulso deverá ser inferior a 10 % do valor da amplitude pico-a-pico (AAE, Sound Source Operating Manual, 2003).

O fabricante não fornece informações no que respeita à directividade da fonte. Sobre os dados gráficos fornecidos (**Figura 3. 4** e **Figura 3. 5**) não são feitas referências à orientação do receptor, portanto, considera-se que as medições foram efectuadas no eixo de maior directividade.

### 3.2.2 Hidrofone RESON TC4034 e Pré-amplificador VP2000

O sistema de recepção é constituído por um hidrofone calibrado da Teledyne RESON modelo TC4034 e um pré-amplificador de voltagem VP2000 do mesmo fabricante, modelo EC6081 (**Figura 3. 6**).

O hidrofone é constituído por um sensor piezoelétrico encapsulado em borracha nitrílica conectado a um BNC através de um cabo blindado de dois condutores com 10 m de comprimento. A borracha nitrílica é especialmente fabricada de forma a garantir uma impedância acústica próxima da água.

Este hidrofone é associado a um pré-amplificador de voltagem VP2000 (modelo EC6081) de largura de banda de 1 MHz que permite um desempenho de baixo ruído em toda a largura de banda.

O hidrofone é conectado por uma entrada BNC ao pré-amplificador, que por sua vez é conectado ao sistema ADC via BNC.



Figura 3. 6 - À esquerda hidrofone RESON TC4034, à direita o pré-amplificador VP2000 (**RESON, 2011**).

O hidrofone RESON TC4034 é de banda larga, esférico e omnidireccional. A banda de frequências que pode ser utilizada encontra-se na gama de 1 Hz a 470 kHz. A resposta plana encontra-se na gama de frequências entre 1 Hz a 250 kHz. A sensibilidade do hidrofone, de acordo com o fabricante, é de  $-218 \text{ dB} \pm 3 \text{ dB}$  re  $1 \text{ V}/\mu\text{Pa}$  para 250 Hz. A **Figura 3. 7** mostra a variação da sensibilidade do hidrofone com a frequência (para frequências superiores a 5 kHz).

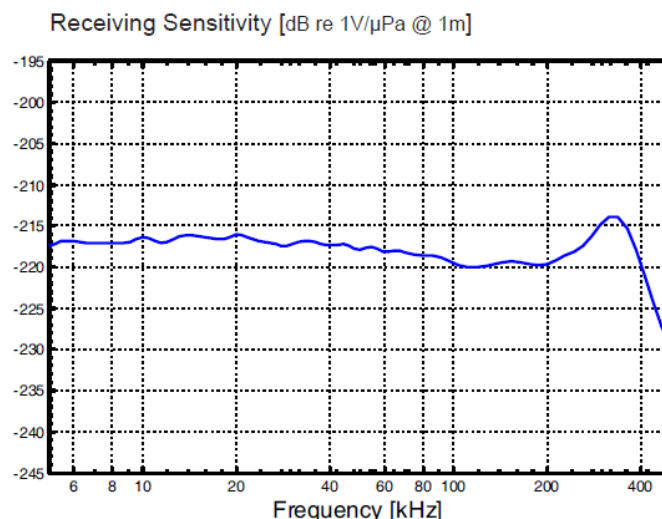


Figura 3. 7 - Resposta em frequência do hidrofone RESON TC4034 (RESON, 2011).

Como já foi referido anteriormente, o hidrofone é onmidireccional ( $\pm 2$  dB, a 100 kHz), quando colocado na horizontal (**Figura 3. 8**). Na vertical apresenta directividade superior a  $270^\circ \pm 3$  dB (a 300 kHz).

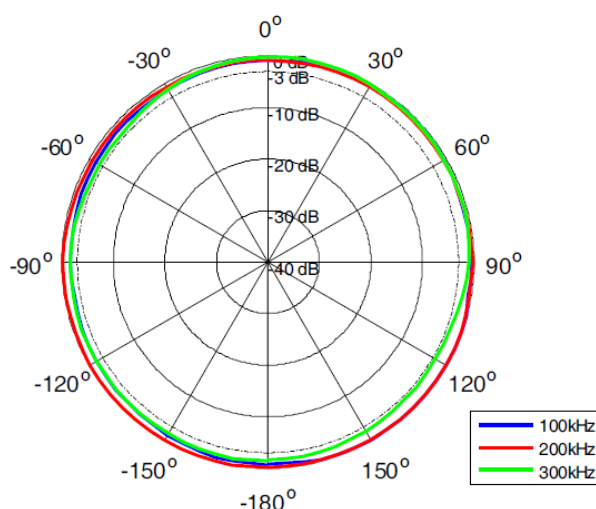


Figura 3. 8 - Padrão de directividade horizontal para as frequências de 100, 200 e 300 kHz.

O pré-amplificador de voltagem VP2000 contém doze filtros passa alto entre 1 Hz e 250 kHz (**Figura 3. 9**) e doze filtros passa baixo entre 1 kHz e 1 MHz (**Figura 3. 10**). Permite seleccionar seis níveis de ganho entre 0 a 50 dB (**Figura 3. 11**) e tem baixo ruído,  $20 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  (aproximadamente  $-154 \text{ dB re } 1\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$  a 1 kHz) (**Figura 3. 12**). É alimentado com uma bateria de 12 V DC.

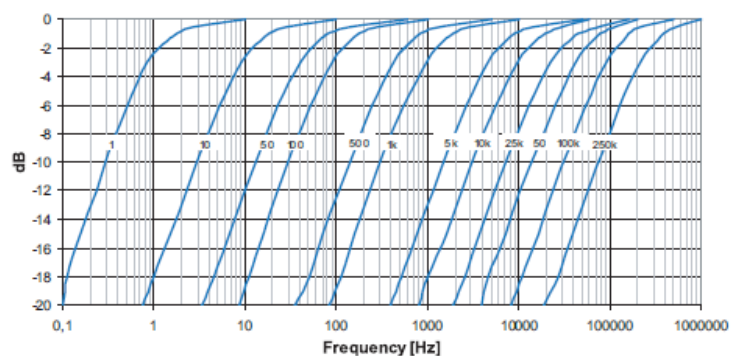


Figura 3. 9 - Características dos filtros passa-alto para cada frequência de corte.

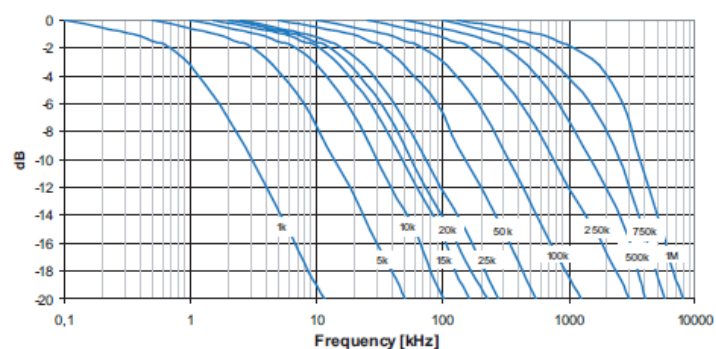


Figura 3. 10 - Características dos filtros passa-baixo para cada frequência de corte.

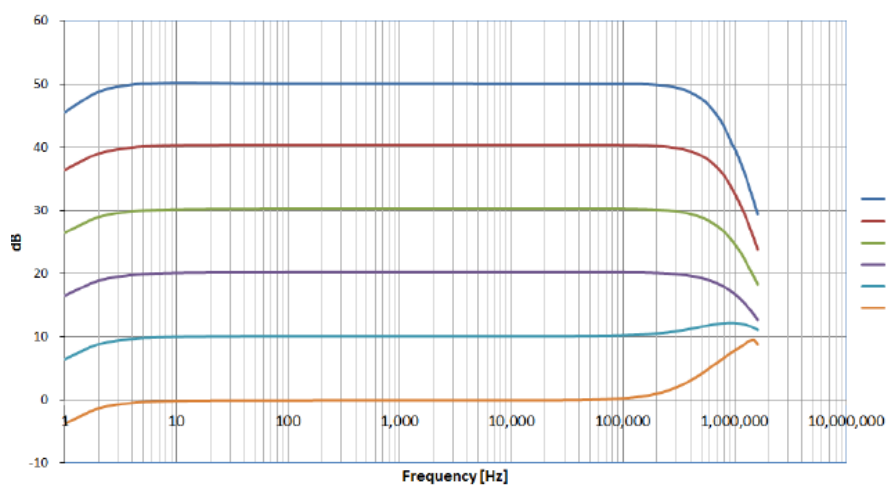


Figura 3. 11 - Características dos ganhos do pré-amplificador em função da frequência.

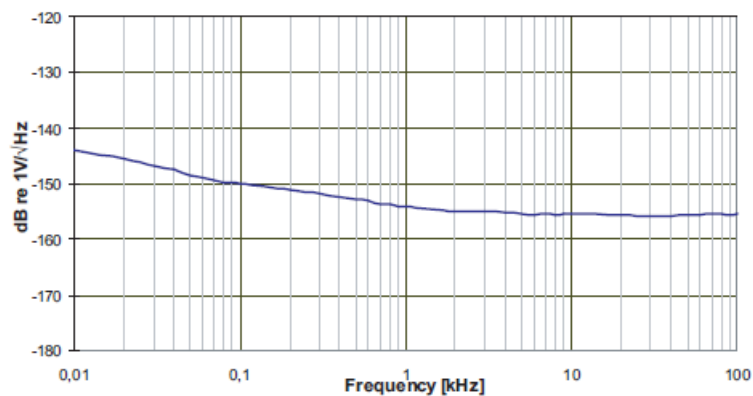


Figura 3. 12 - Espectro de densidade de potência do ruído do pré-amplificador para uma carga de entrada de 1 nF, ganho de 0 dB e um filtro de 1Hz.

### 3.2.3 Carta de conversão analógico/digital NI DAQ USB-6251

A carta ADC NI DAQ USB-6251 é um equipamento fabricado na *National Instruments* e é um sistema portátil de fácil utilização para aquisição de dados (DAQ – *data acquisition*), sendo facilmente conectável a um computador via USB (**Figura 3. 13**).



Figura 3. 13 - Carta ADC NI DAQ USB-6251 (N.I., 2008).

Esta carta de conversão analógico/digital tem 8 entradas de sinal analógico via BNC a 16 bits a uma taxa máxima de 1,25 MS/s<sup>j</sup> (num só canal). A janela de amplitudes é variável, sendo o seu máximo de  $\pm 10\text{ V}$  (N.I., 2008).

Esta carta é conectada a um computador portátil via USB sendo depois registado o sinal digitalizado no *software* LabVIEW SignalExpress versão 3.0. É possível definir a frequência de amostragem (Hz) e taxa de amostragem de cada bloco de gravação (S/s<sup>k</sup>), este último está em

<sup>j</sup> *Million samples per second* MS/s ou, em português, Milhão de amostras por segundo.

<sup>k</sup> *Samples per second* (S/s) ou, em português, amostras por segundo.

concordância com a taxa de disparo da fonte e com o tempo necessário para gravar o impulso completo.

A NI DAQ USB-6251 permite obter  $2^{16}$  amostras entre -10 e +10 V, ou seja, com uma capacidade mínima de discretização de 0,305 mV (N.I., 2008). A dinâmica de amostragem do sistema será de 96,3 dB. Nesta carta a janela de amplitude é variável, sendo possível obter melhor resolução, ajustando o valor máximo de voltagem e portanto reduzindo assim a unidade de contagem (por exemplo: para uma janela de -5 e +5 V, obteríamos uma capacidade mínima de discretização de 0,152 mV).

A carta ADC NI DAQ USB-6251 aplica um filtro analógico passa-baixo cuja frequência é definida automaticamente em função da frequência de amostragem estabelecida. Este filtro atenua o ruído e previne o falseamento de sinais acima da frequência de Nyquist (N.I., 2008). As características deste filtro não são conhecidas.

### 3.3 Descrição do Método

Os equipamentos são distribuídos por dois blocos: o **bloco de aquisição** e o **bloco de transmissão**. O bloco de aquisição é constituído por: (1) hidrofone RESON TC4034; (2) pré-amplificador VP2000 (modelo EC6081) e Bateria de 12 V; (3) Carta ADC NI DAQ USB-6251; (4) Caixa de *trigger* externo<sup>1</sup>; (5) Portátil com *software* LabVIEW SignalExpress v3.0. O bloco de transmissão é constituído por: (1) Fonte de Energia CSP300; (2) Cabo de alta tensão HV4000; (3) Placa *boomer* AA200; (4) Cabos de massa com malha para mergulhar na água.

A metodologia descrita neste trabalho foi considerada a melhor solução para as condições de meio e materiais existentes, já descritas, de acordo com o objectivo pretendido.

#### 3.3.1 Disposição dos equipamentos

Os dois blocos são distribuídos em lados opostos de forma a reduzir interferência de campos electromagnéticos parasitas. A disposição dos blocos encontra-se esquematizada na **Figura 3. 14**.

---

<sup>1</sup> *Trigger* externo – caixa electrónica geradora de um sinal quadrado de baixa amplitude, cujo período define a taxa de disparo das fontes, e por sua vez, o início de gravação de cada bloco de amostras.

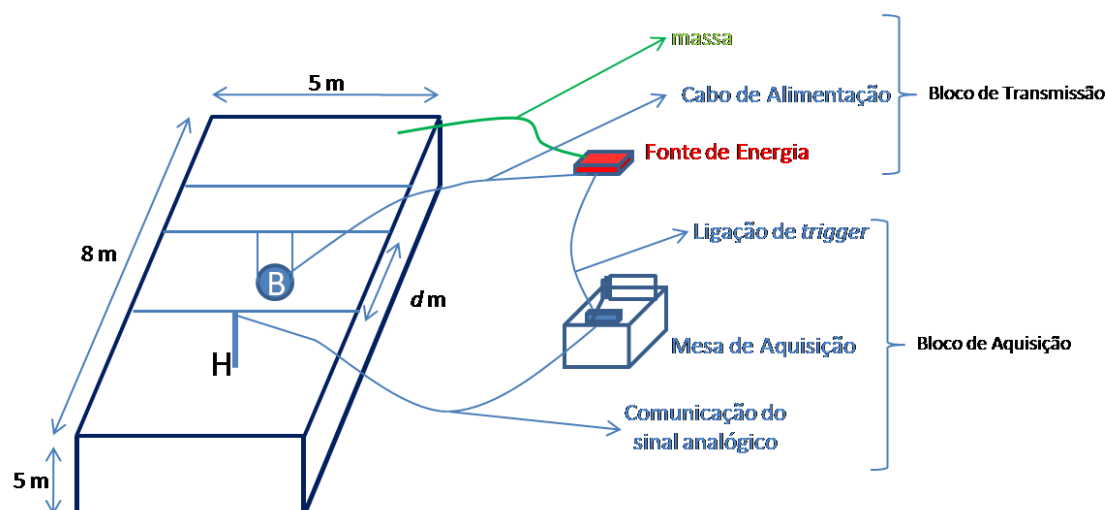


Figura 3. 14 - Distribuição dos blocos de aquisição e de transmissão de acordo com a geometria das instalações. Foi tido em consideração a separação da linha de transmissão e da linha de aquisição para que não houvesse interferência de correntes parasitas. Legenda: H - hidrofone; B - fonte acústica do tipo *boomer*;  $d$  – distância entre fonte acústica e hidrofone.

Primeiro são efectuadas as ligações do **bloco de transmissão** da seguinte forma:

1. Ligação do cabo de alimentação da fonte acústica (HV4000) à fonte de energia. Este cabo é ligado a uma caixa de junção que faz a ligação à fonte de energia (**Figura 3. 15**). A fonte de energia deve ser mantida desligada da alimentação até que todos os equipamentos estejam preparados, e a fonte acústica mergulhada em água.

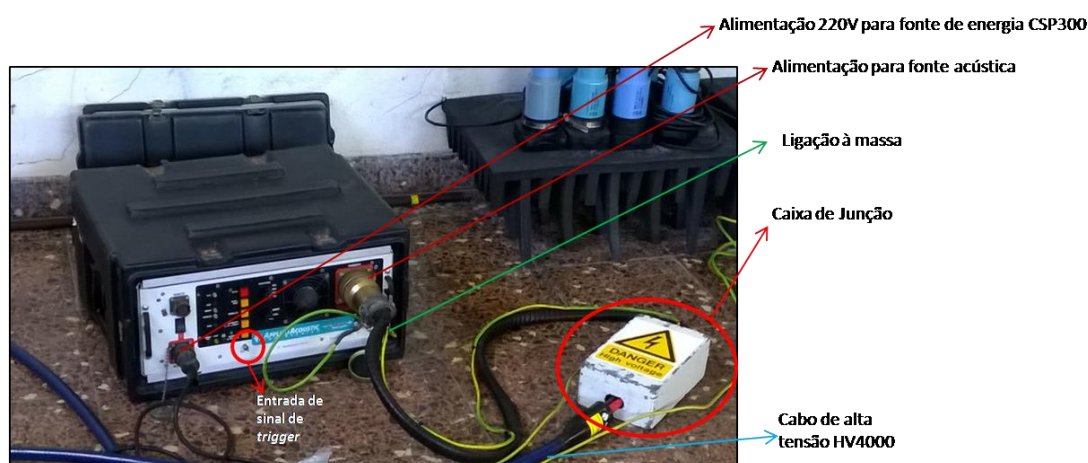


Figura 3. 15 - Descrição das ligações da fonte de energia CSP300.

2. Remoção das bóias da estrutura do *catamaran*. Ligação do cabo HV4000 à fonte acústica. Elevação da estrutura na vertical e colocação de um peso na base de forma a manter a verticalidade (**Figura 3. 16a e b**). São utilizados dois cabos na parte inferior lateral para controlo da rotação da estrutura, garantindo que a estrutura mantenha a perpendicularidade em relação às paredes laterais do tanque, e que a posição do eixo principal da placa ficasse, aproximadamente, coincidente com o eixo principal do hidrofone. Este posicionamento foi realizado após o mergulho da fonte acústica (**Figura 3. 16c**) até à profundidade central do tanque, 2,5 m, onde a placa foi direccionada para a posição do hidrofone (a descrição do posicionamento do hidrofone encontra-se a seguir).



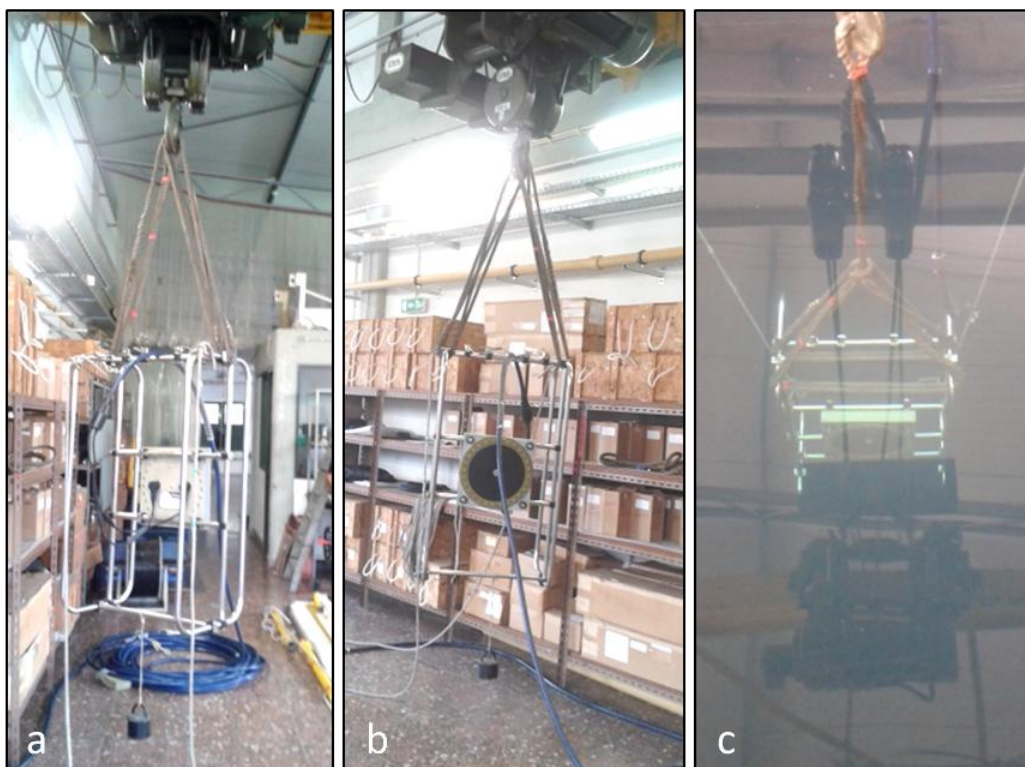


Figura 3. 16 - (a) e (b) Suspensão da estrutura da placa boomer com o peso na base e cabo HV4000 ligado, vista de baixo em (b) e vista de cima em (a); (c) toda a estrutura mergulhada no tanque.

O **bloco de aquisição** foi ligado da seguinte forma:

1. O hidrofone foi colocado numa vara rígida (metálica), direccionado para o centro da placa na posição horizontal (conforme elementos descritivos do **Capítulo 3.2.2 Hidrofone RESON TC4034 E Pré-Amplificador VP2000**, sobre a directividade do hidrofone) e mergulhado a 2,5 m de profundidade (**Figura 3. 17**).



Figura 3. 17 - Colocação do hidrofone na vara devidamente posicionado.

2. O cabo do hidrofone foi ligado ao canal de entrada do pré-amplificador VP2000 e por sua vez, foi feita a ligação do canal de saída do pré-amplificador a um canal de entrada da carta ADC (geralmente é escolhido o canal ai0).



3. A caixa de *trigger* tem dois canais de saída (via BNC). Um dos canais deve ser ligado à fonte de energia e o outro canal a um canal de entrada da carta ADC, de forma a sincronizar a fonte acústica e os registos da carta ADC.

4. A ligação da carta ADC efectua-se através de uma porta USB ao portátil. O *software* LabView SignalExpress v3.0 permite seleccionar o tipo de sinal a receber como voltagem e o respectivo canal (ai0). É também definido o tipo de sinal de *trigger* e a respectiva entrada através de outro canal. Os parâmetros de digitalização do sinal, são introduzidos no *software*.

5. No pré-amplificador, seleccionam-se o ganho e a filtragem em frequência.

A parametrização do software será descrita com melhor detalhe no ponto seguinte.

A ligação à Terra do bloco de aquisição foi efectuada utilizando a instalação eléctrica do edifício.

Para definir a distância mínima entre transdutores foi necessário determinar o limite para o campo próximo, de forma a efectuar medições já no campo distante.

De acordo com a equação (1. 39) do **Capítulo 1.2.7.1 Campo próximo (Distância de Fresnel) e Campo Distante**, consideremos os seguintes parâmetros:

$$a = \frac{38}{2} = 19 \text{ cm}; c \approx 1500 \text{ m/s}; T_p = 101.5 \mu\text{s}$$

O parâmetro  $T_p$  foi medido de acordo com o gráfico da **Figura 3. 4** fornecido pelo fabricante.

A fronteira entre o campo próximo e o campo distante será de  $3 \times R_c \approx 0.6 \text{ m}$ .

Portanto, para obter uma boa representação do comportamento da fonte, foram efectuadas medições às distâncias entre transdutores de 1, 2 e 3 m, utilizando energias de 100, 200 e 300 J.

Os transdutores foram colocados numa posição central do tanque evitando assim registar reflexões que poderiam mascarar o impulso directo.

Em todos os ensaios foi medida a temperatura da água do tanque.

### 3.3.2 Parametrização

O sistema ADC e respectivo *software* de aquisição, fazem a digitalização da voltagem transmitida pelo hidrofone, resultado da transdução da variação de pressão em voltagem. O *software* cria ficheiros em formato TDMS com a discretização de todos os impulsos de forma sequencial, ou seja, arquiva séries de valores desde o início da aquisição até ao final. O início e o fim da aquisição são estabelecidos por ordem manual, pelo utilizador, no *software*.

No âmbito deste trabalho, interessa gravar o máximo número de impulsos entre o início e o fim da gravação. Para tal, a sincronização (*trigger*) entre transmissão e aquisição é de elevada importância, pois vai definir o início de cada bloco de gravação. Cada bloco corresponde a um impulso. Até ao final da aquisição, e portanto do ficheiro TDMS, teremos todos os impulsos sequencialmente (**Figura 3. 18** e **Figura 3. 19**).

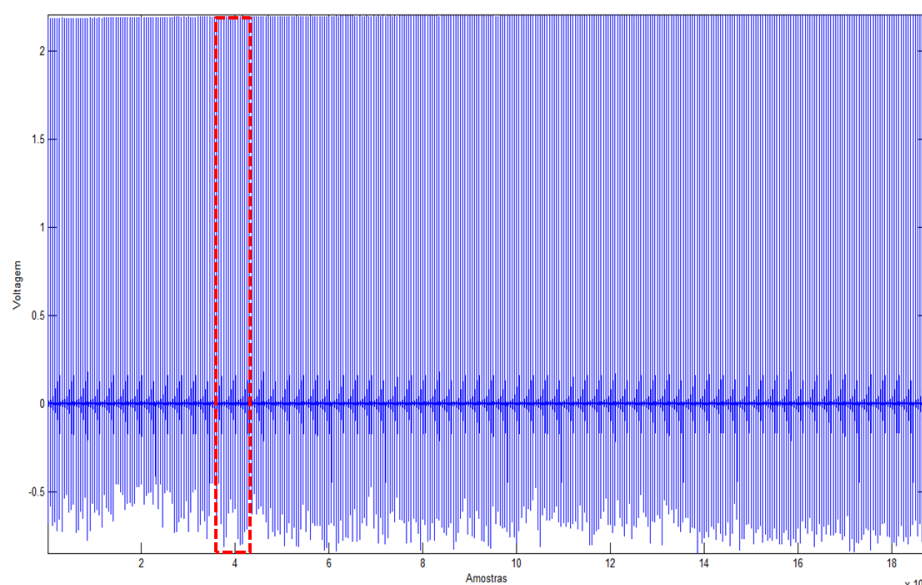


Figura 3. 18 - Exemplo de representação gráfica em Matlab dos dados *RAW* registados no ficheiro TDMS. Foram guardados 375 disparos da fonte num total de 1875000 amostras. Cada disparo tem 100 ms de comprimento de gravação. A zona assinalada a tracejado está amplificada na **Figura 3. 19**.

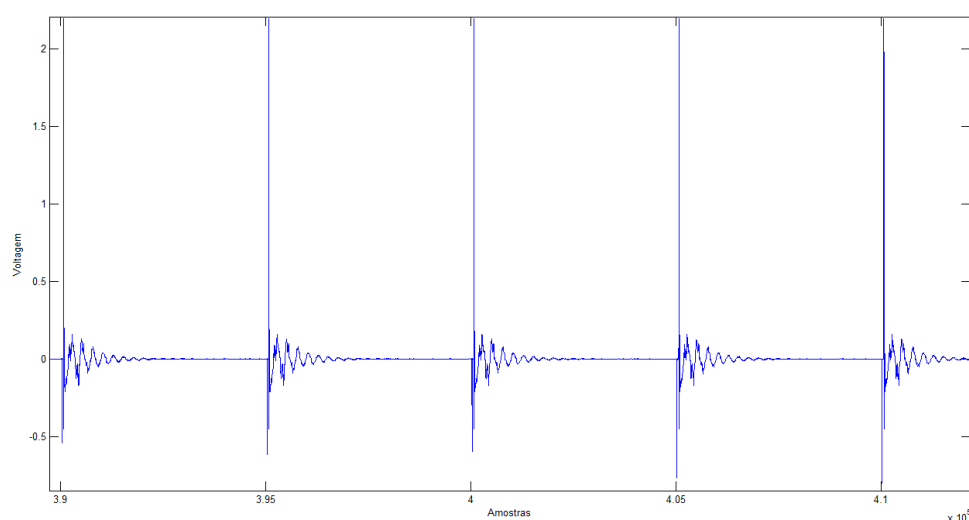


Figura 3. 19 - Amplificação da zona assinalada na **Figura 3. 18**. Observam-se 5 disparos.

O primeiro parâmetro a considerar é o **intervalo entre disparos da fonte (*trigger*)**. É necessário considerar as restrições das fontes (energia e acústica). A fonte de energia não deverá ultrapassar o tempo limite para que os seus condensadores recarreguem energia suficiente entre disparos. A fonte acústica não deverá ultrapassar o tempo limite entre disparos para não danificar o equipamento, considerando que a operação é estática.

De acordo com o que já foi descrito no **Capítulo 3.2.1 Sistema CSP300 e placa boomer AA200**, as restrições das fontes permitem que o *trigger* seja definido a 1 segundo de intervalo entre disparos para um máximo de 200 J de energia de descarga.

A taxa de disparo definida para a transmissão, permitirá dividir a aquisição em blocos de informação. Cada um destes blocos corresponderá a um impulso gerado a partir de um disparo da fonte.

O tempo de duração do bloco terá que ser definido, também, de forma a permitir que o sinal seja bem representado considerando o tempo de propagação do impulso acústico entre a fonte e o hidrofone. A cada disparo da fonte de energia, a fonte acústica gera um impulso que é recebido no hidrofone após a propagação entre os dois transdutores. Este tempo de propagação (ou atraso) é determinado considerando a velocidade de propagação do som na água ( $\approx 1500 \text{ m/s}$ ), ou seja, se os transdutores se encontram à distância de 1,0 m, o hidrofone receberá a onda de pressão a 0,67 ms. O intervalo entre disparos terá que ser superior a este atraso e, seguidamente, o comprimento temporal do bloco terá que registar a resposta em tempo do impulso gerado por cada disparo da fonte acústica.

No *software* são definidos os parâmetros de amostragem, sendo possível defini-los manualmente. É definida a **frequência de amostragem** ( $f_s$ ) e o **número de amostras por cada bloco** ( $S$ ). Este último corresponde à relação entre a frequência de amostragem e o tempo de gravação total do bloco. A frequência de amostragem é definida considerando a banda de frequências expectável para o impulso gerado pela fonte acústica. No manual do sistema *boomer* são indicadas gamas de frequência que variam entre 250 Hz e os 9105 Hz a -6 dB. Conforme foi indicado no **Capítulo 3.2.1**

**Sistema CSP300 e placa boomer AA200**, a gama de frequências a -3dB está entre 310 Hz e 7235 Hz. De acordo com a definição de Simpkin (2005) (ver **Capítulo 1.2.7.1 Campo próximo (Distância de Fresnel) e Campo Distante**), a frequência máxima para a qual o impulso atenua 6 dB é de 9852.2 Hz (para  $T_p = 101.5\mu\text{s}$ ). Sendo esta ultima a componente máxima de frequência do sinal expectável, a frequência de amostragem mínima será de 19704.4 Hz. De forma a sobreamostrar o sinal, a frequência de amostragem terá que ser superior à frequência mínima indicada.

Os ensaios foram realizados em três fases que serão descritas no **Capítulo 4 - Processamento dos dados e Resultados**. Foram definidas as frequências de amostragem de 50 kHz, na **Fase I** e 100 kHz, nas **Fases II e III**. A frequência de Nyquist para o primeiro caso será de 25 kHz e, de acordo com os dados do espectro de frequências fornecido pelo fabricante, esta é a frequência a partir da qual o sinal apresenta  $-46 \text{ dB re } 1 \text{ V/Bar}$  (**Figura 3. 5**). Segundo as especificações descritas no **Capítulo 3.2.3 Carta de conversão analógico/digital NI DAQ USB-6251 o filtro anti-falseamento**, é definido automaticamente a partir de metade da frequência de amostragem.

O número de amostras por bloco e a frequência de amostragem,  $f_s$ , relacionam-se entre si da seguinte forma:

$$S = f_s * \text{tempo de duração da gravação}$$

(3. 1)

De acordo com a frequência de amostragem definida teremos um intervalo entre amostras de:

$$\text{intervalo entre amostras (dt)} = \frac{1}{f_s}$$

(3. 2)

Por exemplo, para uma frequência de amostragem de 50 kHz cujo tempo de gravação do bloco desejado é de 0.1 s, o número de amostras por cada bloco será de 5000 S/s e o intervalo de tempo entre amostras de 20  $\mu$ s.

No pré-amplificador de voltagem, são configurados os **filtros passa-alto e passa-baixo**, para que sejam filtradas frequências fora da gama expectável.

Nos ensaios efectuados foi sempre utilizado um filtro passa-alto de 1 Hz, na primeira fase de ensaios o filtro passa-baixo foi de 50 kHz e na segunda fase foi de 25 kHz.

No pré-amplificador deve ser também seleccionado o **ganho** em decibéis do sinal a ser adquirido. Para que seja possível observar com clareza (ou seja, ocupando pelo menos 80 % da janela de amplitude) todo o sinal recebido e sem *clipping*. No início dos testes define-se o valor mínimo de ganho (0 dB), sendo depois ajustado de forma a facilitar a visualização do sinal durante a aquisição.

Em fases diferentes dos ensaios foram utilizados ganhos de 20 e 30 dB.

## Capítulo 4 - Processamento dos dados e Resultados

Neste capítulo serão descritos os passos necessários para executar as rotinas em código MatLab e os serão expostos os resultados obtidos nas três fases de ensaios.

### 4.1 Processamento de Dados

Todo o processamento executado no âmbito deste trabalho, foi realizado a partir de um código construído no *software* MatLab R2013b versão 8.2.0.701 com o auxílio da *Signal Processing Toolbox*.

A primeira fase do processamento consiste na extracção dos dados digitalizados dos ficheiros TDMS gerados no *software* LabView. Desconhecendo o formato interno do ficheiro foi feita uma pesquisa de forma a encontrar bibliotecas que permitissem abrir o ficheiro em MatLab. Estas bibliotecas consistem num grupo de funções criadas por Hokanson (2011) que permitem abrir e ler o ficheiro (**Figura 4. 1a**) Após abertura da estrutura do ficheiro, foi necessário definir uma variável para conter todos os dados pretendidos, ou seja, todos os impulsos gravados (**Figura 4. 1b e c**).

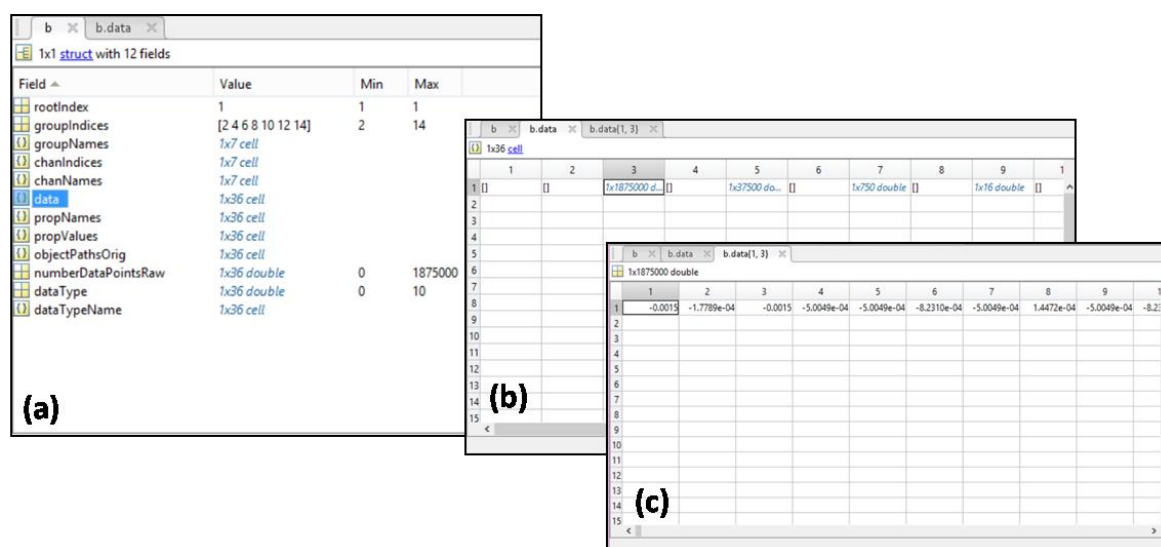


Figura 4. 1 - (a) Estrutura completa do formato TDMS e respectiva informação aí contida; (b) Localização dos dados digitalizados; (c) Todos os dados digitalizados.

Todos os dados digitalizados encontram-se dispostos numa só linha (**Figura 4. 1c**). Cada valor digitalizado corresponde à voltagem recebida do hidrofone. Considerando o número de amostras por cada bloco, é possível dispor a linha de dados numa matriz de voltagem vs impulso.

Por exemplo, na **Figura 4. 2** encontram-se representados todos os disparos de um ensaio em que o número de amostras por bloco é de 5000 S/s. Neste ensaio foram efectuados 375 disparos.

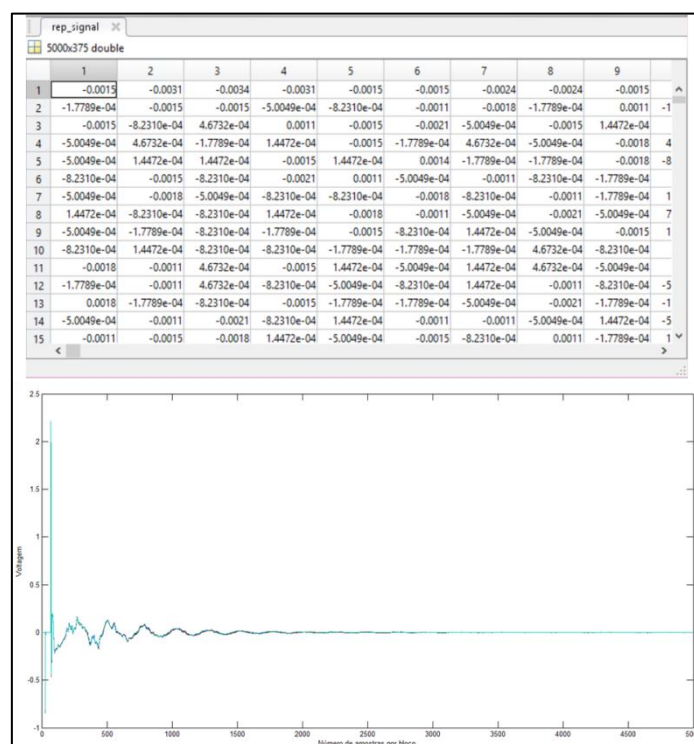


Figura 4. 2 - Conjunto de dados RAW obtidos num ensaio com a placa *boomer* a 100 J e 1 m de distância do hidrofone. O sinal foi amplificado 20 dB.

Depois deste processo faz-se a correcção do ganho ao sinal recebido e define-se o comprimento do sinal de interesse, numa representação de voltagem por tempo. De forma a obter os valores reais de amplitude em Volts, recebido à face do hidrofone, procede-se à correcção do ganho do pré-amplificador (em dB) da seguinte forma:

$$G = 10^{(\text{Ganho}/20)} \Rightarrow \text{Sinal Corrigido} = \frac{\text{Sinal Obtido}}{G} \quad (4.1)$$

Nesta fase, temos a amplitude do sinal (voltagem) corrigida em relação ao número de amostras. Faz-se a conversão de número de amostras para tempo em segundos e obtém-se o intervalo de tempo  $(t_0, t) = \left\{0, \frac{S}{f_s}\right\}$ .

Para definir o comprimento do sinal de interesse, determina-se o início do impulso. Este está dependente da distância entre a fonte transmissora e o receptor ( $R$ ). O instante do início depende da velocidade de propagação do som ( $c$ ) e é determinada por:  $R/c$ .

A velocidade de propagação do som é determinada a partir da equação (1. 27) descrita no **Capítulo 1.2.6 Velocidade do som**. Para este estudo considera-se a salinidade igual a zero, pois a água do tanque é doce, a profundidade corresponde à distância pela qual os equipamentos são

mergulhados (2,5 m) e a temperatura, corresponde à temperatura da água medida no tanque na hora do ensaio.

Por exemplo, para um ensaio em que a temperatura do tanque está a 15,5°C a velocidade de propagação do som corresponderá a  $c = 1466.9 \text{ m/s}$ , e considerando uma distância de 1 m, o impulso será registado aos 0,682 ms (desprezando os atrasos devido à extensão do cabo e aos circuitos eléctricos).

A definição do final do impulso poderá ser variável de acordo com o que se pretende analisar. Poderá ser de interesse analisar todas as oscilações, e então o final corresponderá ao momento em que o sinal se aproxima de zero, ou então poderá ser de interesse analisar apenas o impulso de amplitude máxima e o final corresponderá ao fim do impulso.

Seguindo o objectivo de fazer uma análise a vários componentes do sinal, torna-se necessário determinar um sinal médio dentro de cada conjunto de disparos. No entanto, é também importante compreender se os disparos obtidos em cada ensaio são semelhantes entre si o suficiente para se determinar um sinal médio, representativo do conjunto de sinais. Portanto, sujeitaram-se todos os disparos dentro de um ensaio, a uma avaliação de **repetibilidade** ao longo da aquisição. Foram utilizados dois métodos, um mais convencional e outro sugerido num estudo sobre fontes sísmicas de alta resolução (**Figura 4. 3**). O primeiro método adoptado foi a correlação cruzada entre sinais. Foram determinados os coeficientes de correlação entre cada um dos blocos de sinal e o primeiro sinal produzido pela fonte e entre cada um dos blocos de sinal e o sinal médio (**Figura 4. 3** à esquerda).

O segundo método foi sugerido por Verbeek & McGee em 1995 como o método mais adequado para verificar a repetibilidade de uma fonte sísmica, pois é uma relação mais directa com a amplitude do sinal. Este método determina o índice de repetibilidade ( $RI$ ) entre dois impulsos equivalentes  $s_i(n)$  e  $s_{i+1}(n)$  e é dado por:

$$RI = \min |s(\tau)|$$

(4. 2)

Em que:

$$s(\tau) = \frac{\sum_{t=0}^N |s_i(n) - s_{i+1}(n)|}{\max |s_i(n)| N}$$

(4. 3)

É calculado somatório das diferenças absolutas entre cada amostra,  $n$ , de cada impulso  $s_i$  e  $s_{i+1}$ , sendo depois dividido pelo valor máximo de amplitude em cada um dos sinais com o total de  $N$  amostras, de forma a normalizar todos os impulsos. Se  $s_i(n)$  e  $s_{i+1}(n)$  forem muito semelhantes,  $RI$  será próximo de zero e a repetibilidade é boa (**Figura 4. 3** à direita). O índice de repetibilidade fornece um valor que pode ser visto como uma percentagem do pico de amplitude que se modifica entre os sinais comparados (Verbeek & McGee, 1995). Neste trabalho foram também determinados os valores médio e máximo de  $s(\tau)$  de forma a permitir uma comparação mais célere entre ensaios.

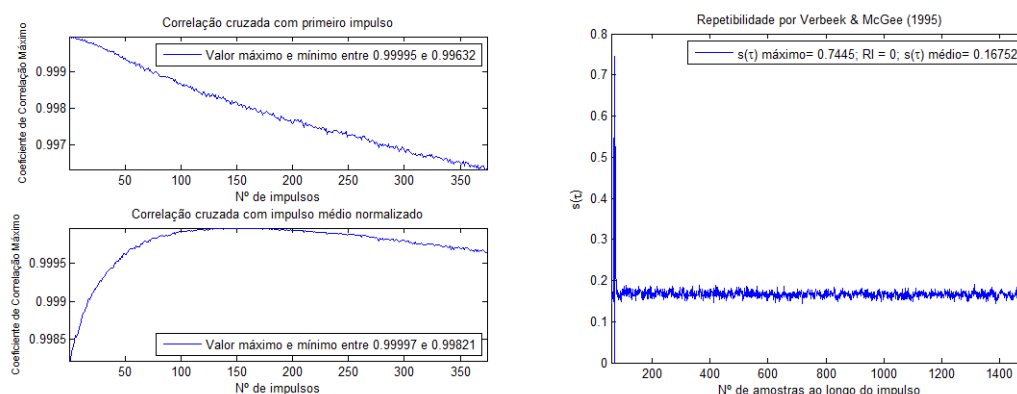


Figura 4. 3 - Análise de repetibilidade a um ensaio efectuado com 100 J de energia, à distância de 1 m entre a fonte e o receptor. À esquerda análise com o método de correlação cruzada e à direita com o método de Verbeek & McGee (1995).

Na análise de repetibilidade por correlação cruzada, é possível fazer uma comparação entre todo o comprimento dos sinais adquiridos durante a aquisição. No caso da análise de Verbeek & McGee (1995) é possível fazer uma comparação entre amostras ao longo do sinal, o que nos permite observar se existem amplitudes mais variáveis durante a aquisição.

Caso se verifique que o sinal tem boa repetibilidade procede-se à determinação de um sinal médio para cada tipo de ensaio. A partir desse sinal médio são determinados vários parâmetros (Voltagem pico-a-pico, Voltagem mínima e máxima, Voltagem rms e linha de reverberação máxima) sobre o impulso de maior amplitude, ou seja, correspondente ao primeiro movimento da placa. De acordo com o fabricante da fonte acústica, a linha de reverberação máxima corresponde a 10 % do valor da amplitude pico-a-pico e não deve ser ultrapassada após o primeiro impulso (**Figura 4. 4**).

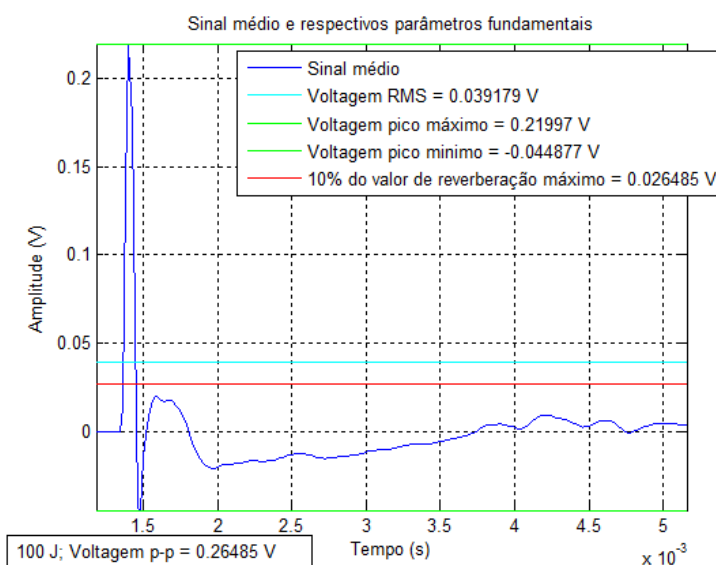


Figura 4. 4 - Sinal médio e respectivos parâmetros de referência correspondente à aquisição analisada na **Figura 4. 3**.



O passo seguinte consiste na determinação do conteúdo **espectral do sinal** que se pretende analisar, de forma a obter a largura de banda do sinal. Para obter o conteúdo espectral de cada sinal médio foi aplicada a transformada discreta de Fourier, sendo utilizado o algoritmo *fft* (*Fast Fourier Transform* ou transformada rápida de Fourier) do MatLab. O sinal médio é corrigido relativamente à sensibilidade do hidrofone (*SHV*, sensibilidade do hidrofone em  $V/\mu Pa$ ) e é determinada a *fft*. Ao resultado obtido, como se trata de um conjunto de números complexos, é determinada a magnitude entre a parte real e imaginária (valor absoluto de  $F(k)$ ) e é recalculada para a escala em decibéis (**Figura 4. 6**):

$$F(k) = \mathcal{F} \left[ \frac{\text{senal médio}(t)}{SHV} \right] \quad (4.4)$$

$$\text{Power Spectrum} = 10 \log |F(k)|^2 \quad \text{dB re } 1V/\mu Pa \quad (4.5)$$

A correcção da amplitude relativamente à **sensibilidade** do hidrofone, permite converter os dados de voltagem para pressão acústica. O fabricante do hidrofone fornece os dados da variação da sensibilidade em função da frequência, e embora o valor mínimo da frequência seja de 5 kHz, para o gráfico da **Figura 4. 5**, informam que para 250 Hz a sensibilidade é de  $-216.5 \text{ dB re } 1V/\mu Pa$ . O gráfico da **Figura 4. 5** foi fornecido após a última calibração do hidrofone.

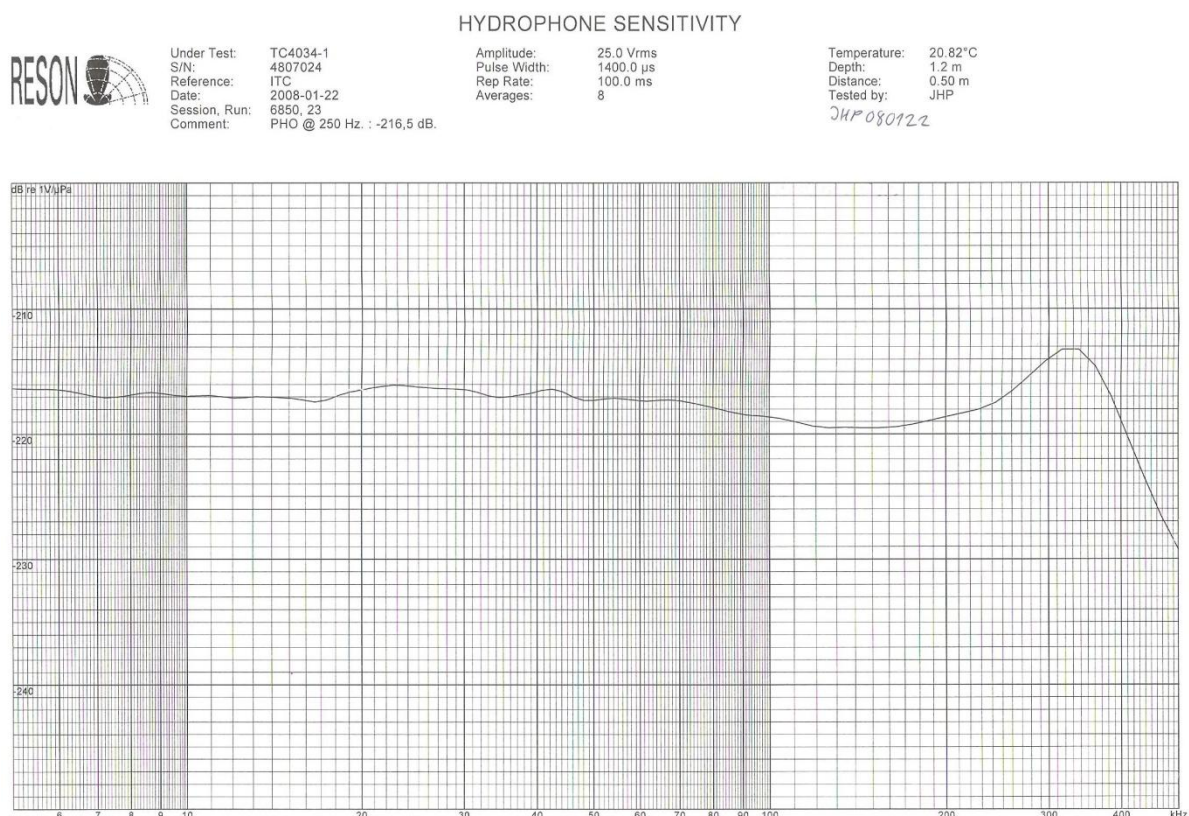


Figura 4. 5 - Dados de sensibilidade fornecido pelo fabricante, para o hidrofone utilizado no âmbito deste trabalho.

De acordo com os dados de calibração fornecidos pelo fabricante do hidrofone, podemos considerar que a diferença entre os 250 Hz e os 5 kHz será dentro das décimas de decibel, pelo que é aceitável fazer uma interpolação linear dos valores entre essas duas frequências e efectuar uma média até ao máximo de frequências expectáveis. Considerando a definição de Simpkin (2005) em que a frequência máxima do sinal para a qual o impulso atenua 6 dB é de 9852.2 Hz, foi feita uma média dos valores de sensibilidade observados no gráfico até 10 kHz. A sensibilidade média utilizada para converter a voltagem em pressão foi de  $-216.75 \text{ dB re } 1\text{V}/\mu\text{Pa}$ .

Na **Figura 4. 6** está representado o espectro de potência obtido num ensaio feito a 1 m de distância e 100 J de energia.

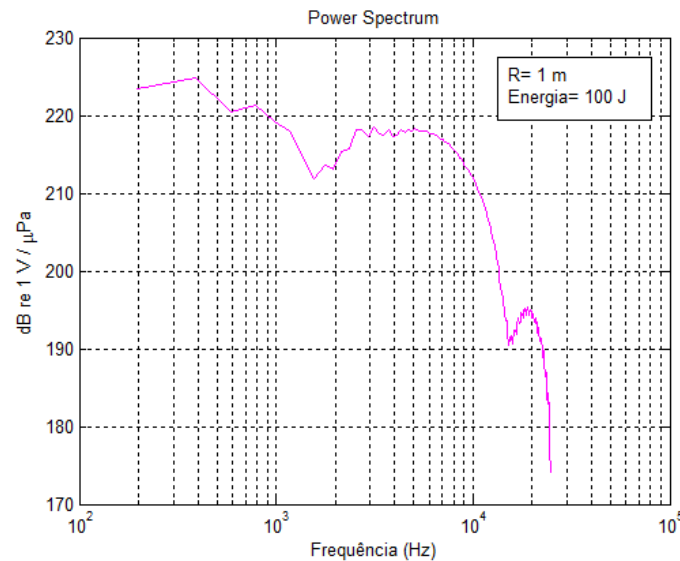


Figura 4. 6 - Resposta espectral do sinal da **Figura 4. 4** considerando toda a janela.

De acordo com a equação (1. 16) o **Nível de Pressão Acústica** (*Sound Pressure Level - SPL*), neste trabalho, foi determinado da seguinte forma:

$$SPL = 20 \times \log \frac{V_{pp}}{OCR} \quad \text{dB re } 1\mu\text{Pa}$$

(4. 6)

Sendo  $V_{pp}$  a amplitude pico a pico em voltagem do sinal médio, *OCR* (*open circuit response*) a sensibilidade do hidrofone em  $\text{V}/\mu\text{Pa}$ ,

O **Nível da Fonte** (*Source Level - SL*) é determinado considerando 1 m de distância da fonte sendo correspondente à diferença entre o *SPL* e todos os factores de perda na transmissão, tal como vem referido pela equação (1. 26). No âmbito deste trabalho o *SL* foi determinado da seguinte forma:

$$SL = SPL + 20 \times \log R + \alpha \times R \quad \text{dB re } 1\mu\text{Pa} @ 1\text{m}$$

(4. 7)

Sendo  $R$  a distância entre a fonte acústica e o hidrofone em metros e  $\alpha$  o coeficiente de absorção do som em água doce.

Para a determinação do coeficiente de absorção foram utilizadas as equações sugeridas por François & Garrison (1982), conforme descrito no **Capítulo 1.2.5.2 Efeitos de Absorção**, sendo criada uma função em MatLab considerando a temperatura variável do tanque em cada conjunto de ensaios. Como este coeficiente depende da frequência do sinal, foi definida a frequência central que, de acordo com dados gráficos do fabricante expostos na **Figura 3. 5**, fornece melhor factor de qualidade (3950 Hz).

No entanto, fazendo uma análise ao comportamento da variação do coeficiente de absorção em função da frequência, constata-se que a variação do coeficiente de absorção é da ordem de  $10^{-5}$  dB/m, logo, na determinação do nível da fonte é um parâmetro quase nulo (**Figura 4. 7**).

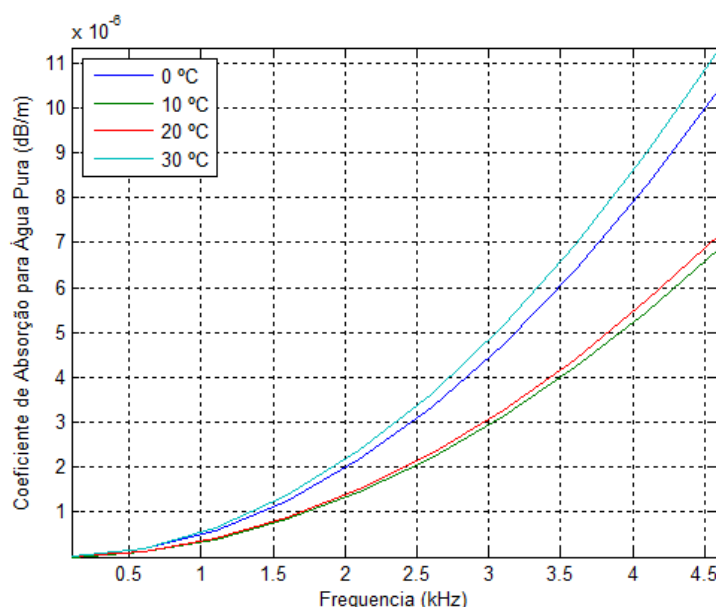


Figura 4. 7 - Determinação do coeficiente de absorção para água pura sugerido por François & Garrison (1982), para as temperaturas de 0, 10, 20 e 30°C.

## 4.2 Resultados

Foram feitas três séries de ensaios (**Fase I, II e III**) que se apresentam por ordem cronológica. Os parâmetros principais de aquisição de dados utilizados em cada uma das Fases estão discriminados na **Tabela 4. 1**.

Tabela 4. 1 - Parâmetros utilizados nas três fases de ensaios.

Fase ensaios	Parâmetros								Temperatura da água do tanque medida (°C)
	Trigger (s)	Frequência de amostragem (kHz)	Tempo de duração do bloco (s)	Número de amostras por bloco (kS/s)	Intervalo entre amostras (μs)	Filtro passa-alto (Hz)	Filtro passa-baixo (kHz)	Ganhos (dB)	
I	1	50	0.1	5	20	1	50	20-30	15,5
II	1	100	0.1	10	10	1	25	20-30	18
III	1	100	0.1	10	10	100	20	20-30	20

Analisando a **Tabela 4. 1** pode-se verificar que houve alterações na definição de alguns parâmetros entre as fases de ensaios. Após a **Fase I** de ensaios, por observação do sinal no domínio do tempo, verificou-se a necessidade de aumentar a taxa de amostragem mantendo o tempo de duração da gravação. Como tal, aumentou-se a frequência de amostragem e consequentemente o número de amostras por cada bloco. Os filtros foram adaptados de forma a contemplar apenas as frequências de interesse do sinal. Os ganhos variaram de acordo com a energia transmitida pela fonte e distância ao hidrofone. A aplicação de ganhos serviu para conseguir visualizar correctamente o sinal recebido durante a aquisição. Nesta tabela estão também incluídas as temperaturas da água medidas no tanque em cada fase de ensaios.

Os resultados são apresentados respeitando a ordem de fases de aquisição. Primeiro são apresentadas as análises de repetibilidade, seguem-se as análises no domínio do tempo, as análises no domínio da frequência e, finalmente, os valores determinados para os níveis de pressão.

Os resultados gráficos das análises de repetibilidade estão descritos no **ANEXO I: Análise de Repetibilidade**. No **ANEXO II: Análise no Domínio do Tempo**, estão representados todos os resultados gráficos da análise no domínio do tempo, assim como os parâmetros base determinados a partir dos impulsos de maior amplitude.

Os pontos que se seguem servem apenas para enunciar todos os resultados obtidos. A descrição e discussão dos resultados serão efectuadas no **Capítulo 5 – Discussão dos Resultados e Considerações Finais**.

#### 4.2.1 Fase I

Relativamente à análise de repetibilidade, constatou-se que a parametrização utilizada nos ensaios da **Fase I** não influenciou os resultados das correlações cruzadas e índices de repetibilidade. Os valores obtidos são considerados aceitáveis<sup>m</sup> com vista à análise do sinal que se pretende executar (**Tabela 4. 2** e **ANEXO I: Análise de Repetibilidade**).

<sup>m</sup> Para a correlação cruzada é considerado aceitável uma variação de coeficiente entre 1-0.9. No caso da análise de Verbeek & McGee (1995) o *RI* deverá ser muito próximo de zero.

Tabela 4. 2 - Análise de repetibilidade em todos os ensaios da Fase I.

Tabela 4. 2 – Análise de Repetibilidade em todos os ensaios da Fase 1.								
Energia (J)	Distância entre transdutores (m)	Coeficiente de Correlação				s(τ)		RI
		Com o 1º Impulso		Com o Impulso médio				
		máximo	mínimo	máximo	mínimo	máximo	médio	
100	1	0.999999	0.999450	0.999999	0.999780	0.74450	0.17818	0
200		1.000000	0.977800	1.000000	0.979820	1.57870	0.11016	0
300		1.000000	0.999140	1.000000	0.999350	0.43380	0.10466	0.019919
100	2	1.000000	0.994930	1.000000	0.998310	0.85051	0.12527	0
200		0.999960	0.999170	0.999980	0.999560	0.63596	0.25081	0.099139
300		0.999990	0.999760	1.000000	0.999890	0.50285	0.21080	0
100	3	1.000000	0.999090	1.000000	0.999380	0.44883	0.08963	0
200		1.000000	0.991610	1.000000	0.992740	2.40030	0.21745	0
300		1.000000	0.999300	1.000000	0.999570	0.71869	0.11407	0

Na **Figura 4. 8**, **Figura 4. 9** e **Figura 4. 10** está representado graficamente a média dos sinais obtidos na **Fase I**, amplitude em função do tempo, para as três energias de transmissão e distâncias entre transdutores. No **ANEXO II: Análise no Domínio do Tempo**, estão representados todos os resultados gráficos da análise no domínio do tempo individualmente, assim como os parâmetros base determinados a partir dos impulsos de maior amplitude.

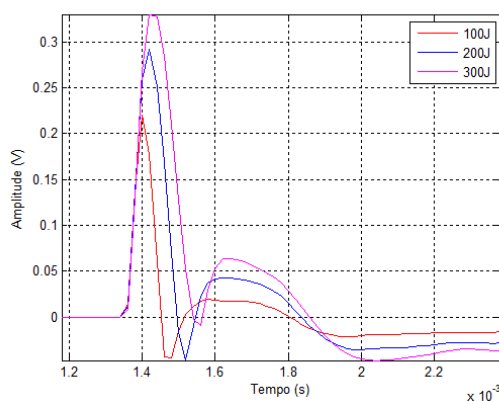


Figura 4. 8 - Resultados em amplitude (V) em função do tempo para a distância de 1 m e energias de 100, 200 e 300 J.

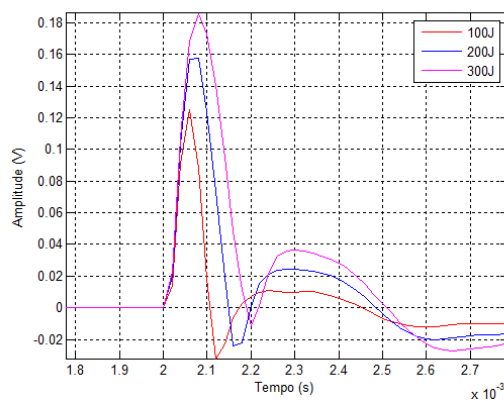


Figura 4. 9 - Resultados em amplitude (V) em função do tempo para a distância de 2 m e energias de 100, 200 e 300 J.

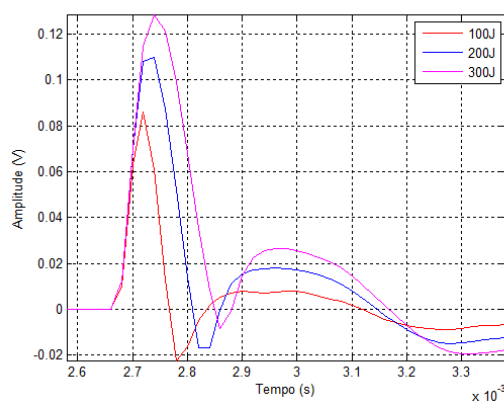


Figura 4. 10 - Resultados em amplitude (V) em função do tempo para a distância de 3 m e energias de 100, 200 e 300 J.

Com o objectivo de comparar a forma do sinal com a mesma energia e distâncias diferentes, os sinais foram normalizados para uma amplitude máxima de 1 V e corrigidos em distância de forma a iniciar no mesmo momento. Na **Figura 4. 11**, **Figura 4. 12** e **Figura 4. 13** estão representados os sinais transmitidos com a mesma energia e a distâncias diferentes.

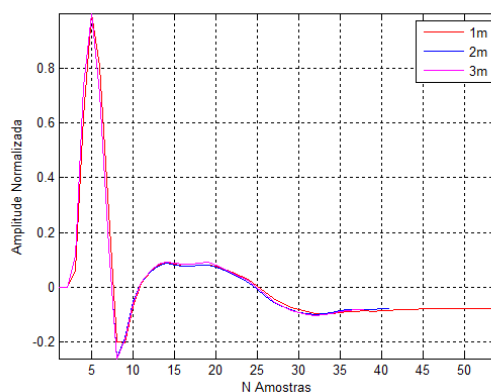


Figura 4. 11 - Sinais transmitidos com 100 J de energia às distâncias de 1, 2 e 3 m.

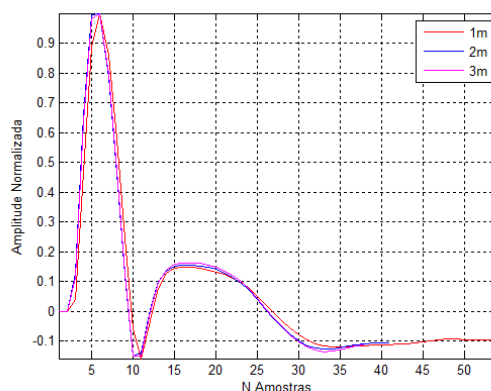


Figura 4. 12 - Sinais transmitidos com 200 J de energia às distâncias de 1, 2 e 3 m.

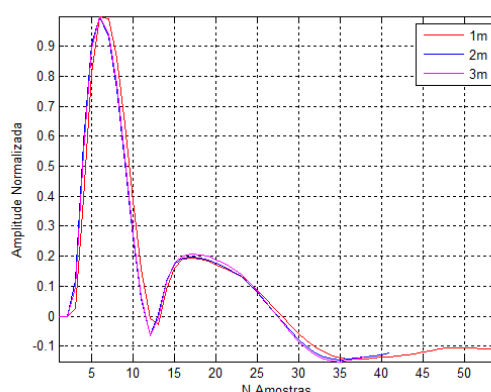


Figura 4. 13 - Sinais transmitidos com 300 J de energia às distâncias de 1, 2 e 3 m.

Na **Figura 4. 11**, **Figura 4. 12** e **Figura 4. 13** não se observam diferenças muito significativas.

Foram determinados os parâmetros base conforme vem descrito no **Capítulo 1.2.2 Parâmetros fundamentais**, com vista à análise comparativa dos sinais representados nas figuras anteriores. Estes parâmetros estão representados na **Tabela 4. 3**.

Tabela 4. 3 - Parâmetros determinados a partir dos dados de amplitude em função do tempo.

Energia (J)	Distância entre transdutores (m)	Amplitude máxima (V)	Amplitude mínima (V)	Amplitude pico-a-pico (V)	Duração do Impulso ( $\mu$ s)	$T_p$ ( $\mu$ s)
100	1	0.220	-0.045	0.265	180	112
200		0.292	-0.046	0.338	200	156
300		0.330	-0.010	0.340	225	199
100	2.08	0.125	-0.032	0.157	180	107
200		0.158	-0.024	0.182	200	149
300		0.186	-0.012	0.198	220	190
100	2.98	0.086	-0.022	0.108	180	107
200		0.110	-0.017	0.127	200	149
300		0.129	-0.008	0.137	220	190

Foram posteriormente determinados os espectros de frequência dos sinais representados na **Figura 4. 8**, **Figura 4. 9** e **Figura 4. 10**. Os resultados estão representados na **Figura 4. 14**, **Figura 4. 15** e **Figura 4. 16**.

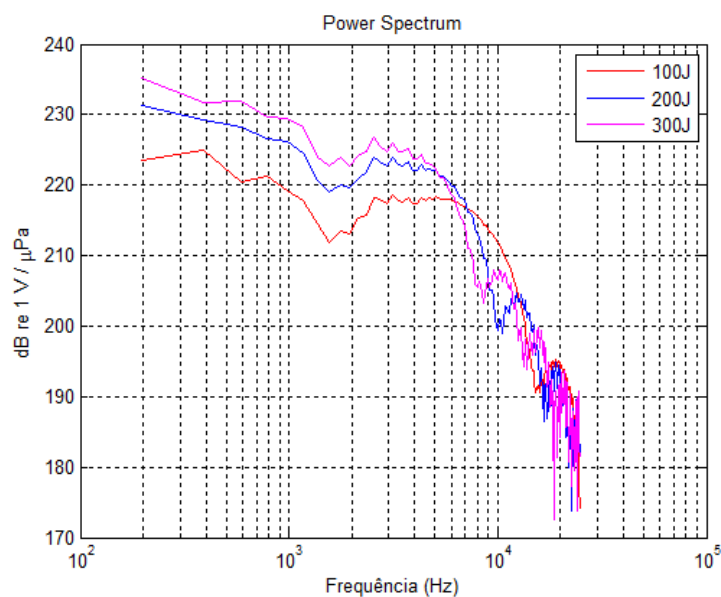


Figura 4. 14 - Espectro de frequências (*Power Spectrum*) dos sinais representados na **Figura 4. 8** (Energias de 100, 200 e 300 J à distância entre transdutores de 1 m).

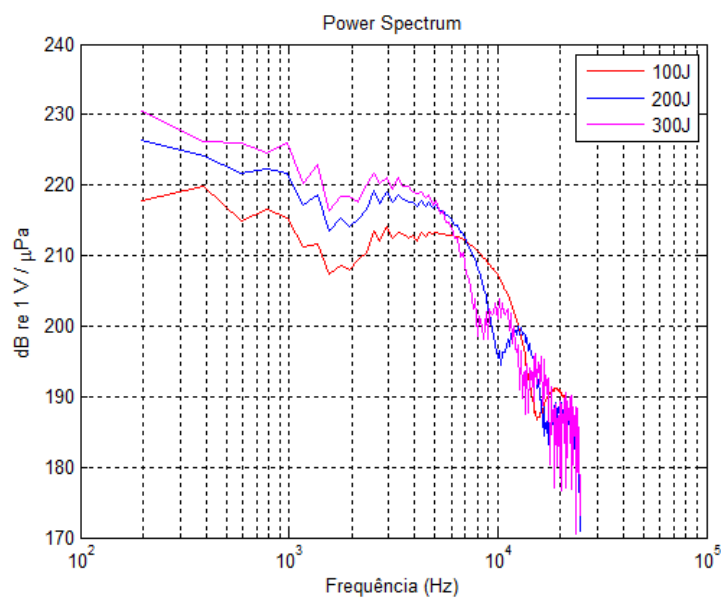


Figura 4. 15 - Espectro de frequências (*Power Spectrum*) dos sinais representados na **Figura 4. 9** (Energias de 100, 200 e 300 J à distância entre transdutores de 2 m).



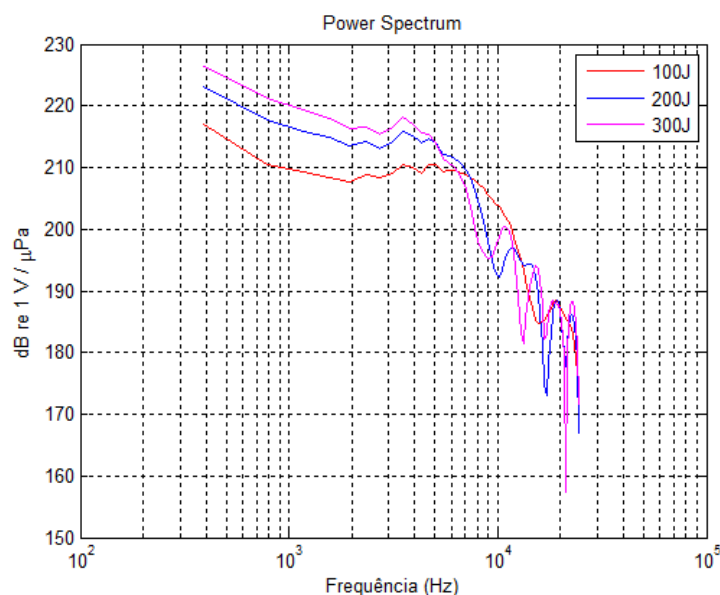


Figura 4. 16 - Espectro de frequências (*Power Spectrum*) dos sinais representados na **Figura 4. 10** (Energias de 100, 200 e 300 J à distância entre transdutores de 3 m).

Os resultados da conversão de voltagem para pressão e determinação dos níveis de pressão, vêm discriminados na **Tabela 4. 4**.

Tabela 4. 4 - Valores determinados relativamente aos níveis de pressão. SPL (nível de pressão acústica) e SL (nível da fonte à distância de referência de 1 m).

Energia (J)	Distância entre transdutores (m)	Pressão pico-a-pico (Pa)	SPL (dB re V/μPa)	SL (dB re V/μPa @ 1 m)
100	1	18220.03	205.21	205.21
200		23257.92	207.33	207.33
300		23370.32	207.37	207.37
100	2.08	10790.46	200.64	207.02
200		12491.54	201.91	208.29
300		13589.36	202.66	209.03
100	2.98	7450.90	197.43	206.93
200		8711.06	199.02	208.29
300		9410.61	199.47	208.96

## 4.2.2 Fase II

Relativamente à análise de repetibilidade (**Tabela 4. 5** e **ANEXO I: Análise de Repetibilidade**) constatou-se que na **Fase II** dos ensaios as correlações cruzadas indicam valores aceitáveis (coeficientes de correlação em média de 0,99). Relativamente aos resultados de  $s(\tau)$  e de RI para são mais elevados relativamente à **Fase I** e à **Fase III**, conforme se irá observar em seguida. O que indica que existe menor correlação entre os sinais.

Tabela 4. 5 - Análise de repetibilidade em todos os ensaios da Fase II.

Energia (J)	Distância entre transdutores (m)	Coeficiente de Correlação				s(τ)		RI
		Com o 1º Impulso		Com o Impulso médio				
		máximo	mínimo	máximo	mínimo	máximo	médio	
100	2	0.996910	0.991450	0.999870	0.995750	1.85400	0.99200	0.043905
200		0.999430	0.997430	0.999940	0.998500	1.07740	0.58566	0

Na **Figura 4. 17** está representado graficamente a média dos sinais obtidos na **Fase II**, em amplitude em função do tempo, para as duas energias utilizadas. No **ANEXO II: Análise no Domínio do Tempo**, estão representados todos os resultados gráficos da análise no domínio do tempo individualmente, assim como os parâmetros base determinados a partir dos impulsos de maior amplitude.

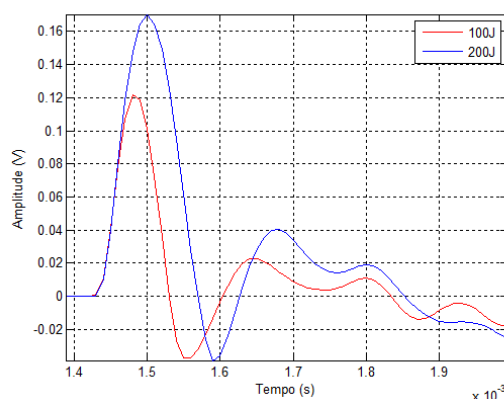


Figura 4. 17 - Resultados em amplitude (V) em função do tempo para a distância de 2 m e energias de 100 e 200 J.

Foram determinados os parâmetros base, conforme vem descrito no **Capítulo 1.2.2 Parâmetros fundamentais**, com vista à análise comparativa dos sinais representados na **Figura 4. 17**. Estes parâmetros estão representados na **Tabela 4. 6**.

Tabela 4. 6 - Parâmetros determinados a partir dos dados de amplitude em função do tempo.

Energia (J)	Distância entre transdutores (m)	Amplitude máxima (V)	Amplitude mínima (V)	Amplitude pico-a-pico (V)	Duração do Impulso ( $\mu$ s)	Tp ( $\mu$ s)
100	2	0.122	-0.037	0.159	180	100
200		0.170	-0.039	0.209	200	139

Foram posteriormente determinados os espectros de frequência dos sinais representados na **Figura 4. 17**. Os resultados estão demonstrados na **Figura 4. 18**.

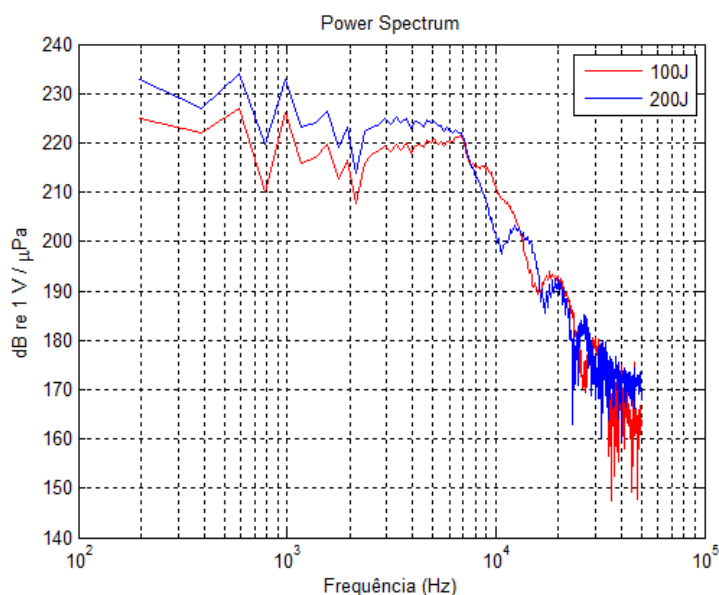


Figura 4. 18 - Espectro de frequências dos sinais representados na **Figura 4. 17** (Energias de 100 e 200 J à distância entre transdutores de 2 m).

Os resultados da conversão de voltagem para pressão e determinação dos níveis de pressão, vêm discriminados na **Tabela 4. 7**.

Tabela 4. 7 - Valores determinados relativamente aos níveis de pressão. SPL (nível de pressão acústica) e SL (nível da fonte à distância de referência de 1 m).

Energia (J)	Offset (m)	Pressão pico-a-pico (Pa)	SPL (dB re V/μPa)	SL (dB re V/μPa @ 1 m)
100	2	10952.79	200.77	206.81
200		14383.84	203.14	209.18

### 4.2.3 Fase III

Relativamente à análise de repetibilidade, constatou-se que a parametrização utilizada nos ensaios da **Fase III** não influenciou os resultados das correlações cruzadas e índices de repetibilidade. Os valores obtidos são considerados aceitáveis<sup>n</sup> com vista à análise do sinal que se pretende executar (**Tabela 4. 8** e **ANEXO I: Análise de Repetibilidade**).

<sup>n</sup> Para a correlação cruzada é considerado aceitável uma variação de coeficiente entre 1-0.9. No caso da análise de Verbeek & McGee (1995) o *RI* deverá ser muito próximo de zero.

Tabela 4. 8 - Análise de repetibilidade em todos os ensaios da Fase III.

Tabela 4. 8 - Análise de Repetibilidade em todos os ensaios da Fase III.								
Energia (J)	Distância entre transdutores (m)	Coeficiente de Correlação				s(τ)		RI
		Com o 1º Impulso		Com o Impulso médio				
		máximo	mínimo	máximo	mínimo	máximo	médio	
100	1	0.99997	0.99969	0.99999	0.99989	0.11005	0.06776	0
200		0.99999	0.99981	1.00000	0.99994	0.10354	0.06248	0
300		0.99999	0.99975	1.00000	0.99992	0.07900	0.04869	0
100	2	0.99992	0.99962	0.99996	0.99985	0.20532	0.13029	0
200		0.99997	0.99990	0.99999	0.99996	0.14661	0.08369	0
300		0.99998	0.99990	0.99999	0.99997	0.11969	0.07167	0
100	3	0.99981	0.99970	0.99991	0.99984	0.27612	0.16988	0
200		0.99994	0.99935	0.99996	0.99977	0.33253	0.20233	0

Os coeficientes de correlação apresentam-se na ordem dos 0,999 e os de  $s(\tau)$  e de RI são, em média, os mais baixos relativamente às **Fases I e II**, o que representa uma boa correlação.

Na **Figura 4. 19**, **Figura 4. 20** e **Figura 4. 21** está representado graficamente a média dos sinais obtidos na **Fase III**, em amplitude em função do tempo, para as três energias de transmissão e distâncias entre transdutores. No **ANEXO II: Análise no Domínio do Tempo**, estão representados todos os resultados gráficos da análise no domínio do tempo individualmente, assim como os parâmetros base determinados a partir dos impulsos de maior amplitude.

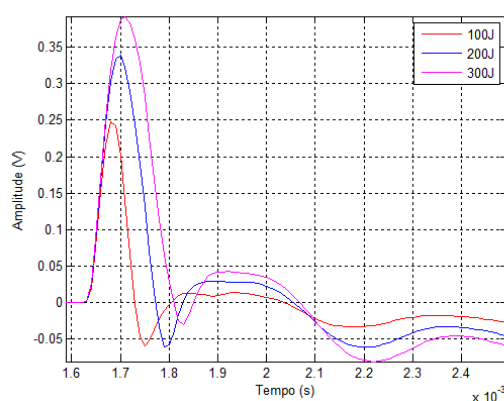


Figura 4. 19 - Resultados em amplitude (V) em função do tempo para a distância de 1 m e energias de 100, 200 e 300 J.

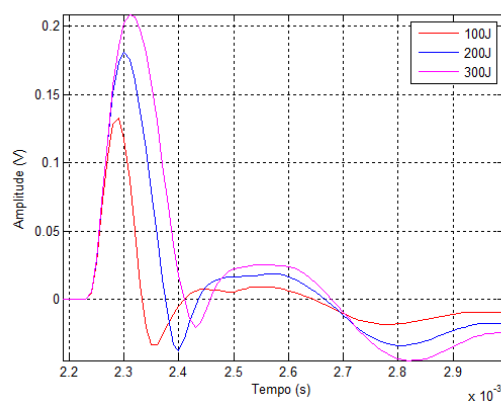


Figura 4. 20 - Resultados em amplitude (V) em função do tempo para a distância de 2 m e energias de 100, 200 e 300 J.

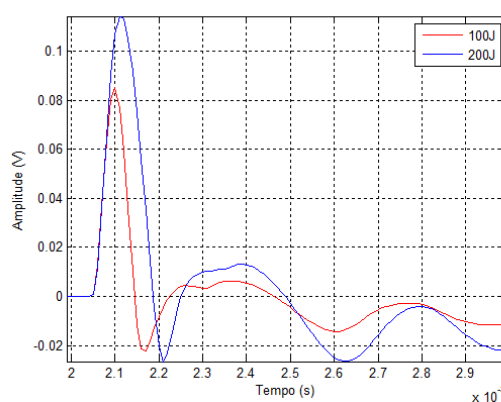


Figura 4. 21 - Resultados em amplitude (V) em função do tempo para a distância de 3 m e energias de 100 e 200 J.

Com o objectivo de comparar a forma do sinal com a mesma energia e diferentes distâncias, os sinais foram normalizados para uma amplitude máxima de 1 V e corrigidos em distância de forma a iniciar no mesmo momento. Na **Figura 4. 22**, **Figura 4. 23** e **Figura 4. 24** estão representados os sinais transmitidos com a mesma energia e a distâncias diferentes.

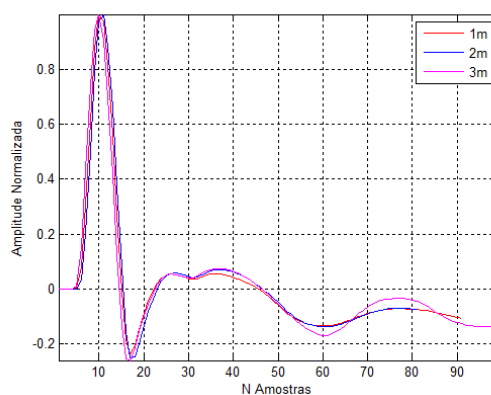


Figura 4. 22 - Sinais transmitidos com 100 J de energia às distâncias de 1, 2 e 3 m.

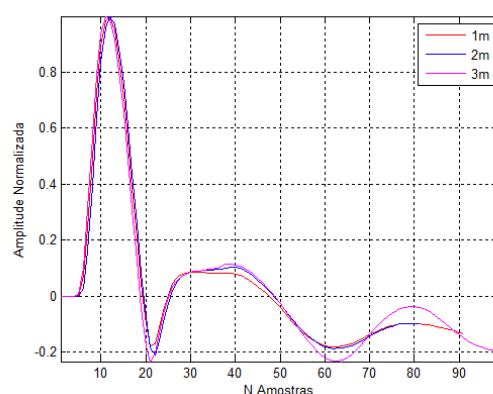


Figura 4. 23 - Sinais transmitidos com 200 J de energia às distâncias de 1, 2 e 3 m.

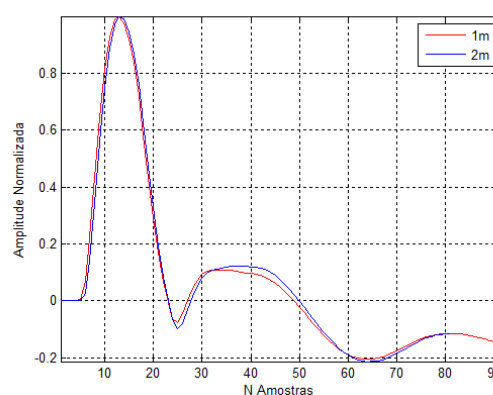


Figura 4. 24 - Sinais transmitidos com 300 J de energia às distâncias de 1, 2 e 3 m.

Na **Figura 4. 22**, **Figura 4. 23** e **Figura 4. 24** não se observam diferenças significativas na forma do sinal. No entanto, a coda do sinal após o primeiro impulso é mais variável à distância de 3 m.

Foram determinados os parâmetros base, conforme vem descrito no **Capítulo 1.2.2 Parâmetros fundamentais**, com vista à análise comparativa dos sinais representados nas figuras anteriores. Estes parâmetros estão representados na **Tabela 4. 9**.

Tabela 4. 9 - Parâmetros determinados a partir dos dados de amplitude em função do tempo.

Energia (J)	Distância entre transdutores (m)	Amplitude máxima (V)	Amplitude mínima (V)	Amplitude pico-a-pico (V)	Duração do Impulso (μs)	Tp (μs)
100	1	0.248	-0.059	0.307	170	100
200		0.339	-0.060	0.399	209	143
300		0.392	-0.030	0.422	230	179
100	2	0.133	-0.034	0.166	180	103
200		0.181	-0.038	0.219	200	145
300		0.209	-0.021	0.230	227	180
100	3	0.085	-0.022	0.107	175	95
200		0.114	-0.027	0.141	210	137

Foram posteriormente determinados os espectros de frequência dos sinais representados na **Figura 4. 19**, **Figura 4. 20** e **Figura 4. 21**. Os resultados estão demonstrados na **Figura 4. 25**, **Figura 4. 26** e **Figura 4. 27**.

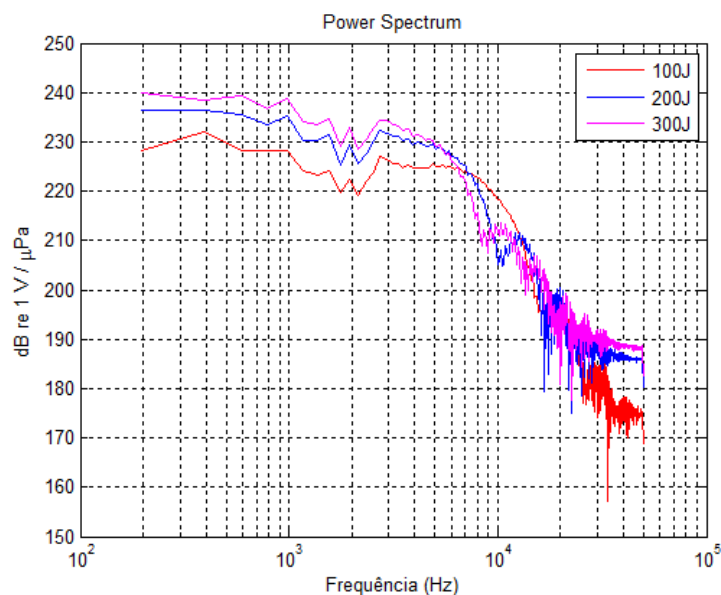


Figura 4. 25 - Espectro de frequências dos sinais representados na **Figura 4. 19** (Energias de 100, 200 e 300 J à distância entre transdutores de 1 m).

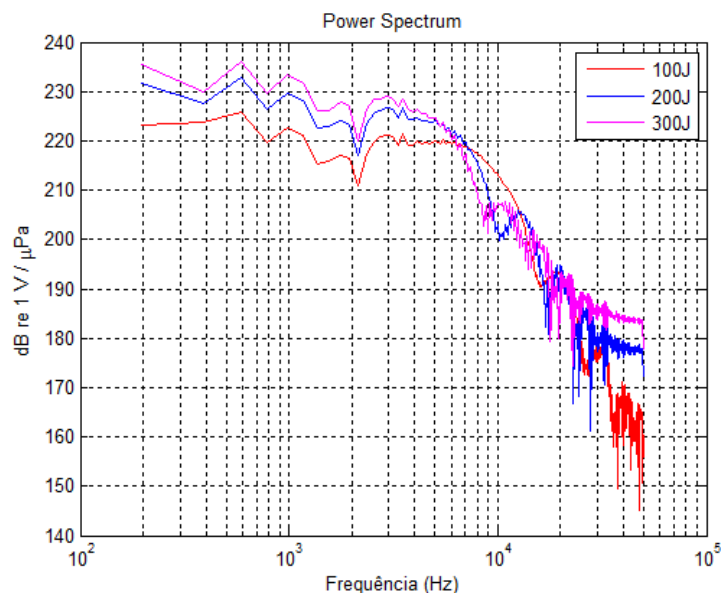


Figura 4. 26 - Espectro de frequências dos sinais representados na **Figura 4. 20** (Energias de 100, 200 e 300 J à distância entre transdutores de 2 m).

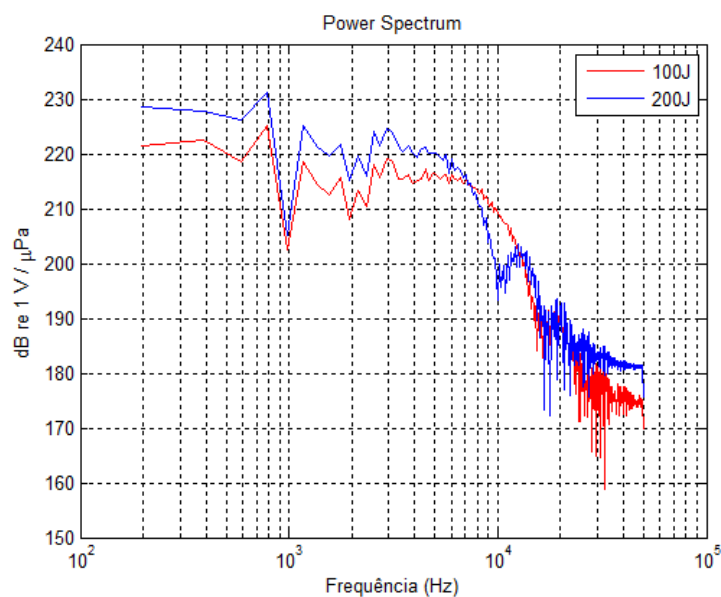


Figura 4. 27 - Espectro de frequências dos sinais representados na **Figura 4. 21** (Energias de 100 e 200 J à distância entre transdutores de 3 m).

Os resultados da conversão de voltagem para pressão e determinação dos níveis de pressão, vêm discriminados na **Tabela 4. 10**.

Tabela 4. 10 - Valores determinados relativamente aos níveis de pressão. SPL (nível de pressão acústica) e SL (nível da fonte à distância de referencia de 1 m).

Energia (J)	Distância entre transdutores (m)	Pressão pico-a-pico (Pa)	SPL (dB re V/ $\mu$ Pa)	SL (dB re V/ $\mu$ Pa @ 1 m)
100	1	21095.33	206.48	206.48
200		27374.46	208.75	208.75
300		28993.65	209.25	209.25
100	2	11401.70	201.14	207.16
200		15025.07	203.54	209.56
300		15755.31	203.95	209.97
100	3	7350.17	197.33	206.87
200		9660.20	199.70	209.24



## Capítulo 5 – Discussão dos Resultados e Considerações Finais

### 5.1 Discussão dos Resultados

Relativamente aos resultados obtidos na análise de repetibilidade (ver **ANEXO I: Análise de Repetibilidade**) constata-se que para todas as Fases de ensaios os coeficientes de correlação cruzada apresentam em média valores superiores a 0,99, o que indica forte correlação. O método da correlação cruzada permite observar diferenças entre impulsos ao longo de cada aquisição. Em média, os coeficientes são inferiores na correlação cruzada com o primeiro impulso em todos os casos. Observando graficamente a correlação cruzada com o primeiro impulso (conforme **ANEXO I: Análise de Repetibilidade**), é possível identificar, nas **Fases I e III**, uma tendência negativa. Ou seja, o primeiro impulso é significativamente diferente do último impulso. Este facto, poderá sugerir que a placa não produz um impulso adequado nos primeiros momentos. Sendo assim, será conveniente proporcionar um período de ambientação da placa, que deve ser estudado e determinado. Também se observa, graficamente, em alguns casos (**Fase I** a 200 J, 1 e 3 m; 300 J, 1 e 3 m) picos de valor inferior à média dos valores de coeficiente. Esses picos, revelam quais os impulsos com menor repetibilidade, permitindo, caso seja desejável, remover impulsos anómalos. Na **Fase II**, apesar dos valores elevados dos coeficientes de correlação (em média de 0,99) observa-se graficamente (conforme **ANEXO I: Análise de Repetibilidade**) um comportamento que aparenta ter alguma periodicidade. Coloca-se a hipótese de haver interferências electromagnéticas desconhecidas no sistema.

Os resultados de  $s(\tau)$  revelam maiores diferenças entre Fases de ensaio. Este método permite observar as diferenças entre amostras de todos os sinais, em todo o comprimento do sinal. Observando os resultados da **Tabela 4. 2**, **Tabela 4. 5** e **Tabela 4. 8** e as representações gráficas do **ANEXO I: Análise de Repetibilidade**, facilmente se observa, em todas as Fases, que os valores mais variáveis se encontram associados à zona correspondente às maiores amplitudes, ou seja, ao primeiro impulso da placa. Na **Fase I** a coda do sinal é mais próxima de zero e menos variável. Na **Fase II**, comparando com todas as Fases, os valores são mais elevados e mais variáveis na coda do sinal. A **Fase III** é a que apresenta valores mais baixos e mais próximos de zero.

Posteriormente às medições da **Fase II**, o equipamento foi enviado ao fabricante para **calibração**. O certificado de calibração encontra-se no **ANEXO III** e a **Tabela 5. 1** resume os resultados fornecidos. Neste certificado vêm medições sobre comprimento de impulso, voltagem pico-a-pico, nível da fonte (SL), e limite de reverberação, assim como representações gráficas do sinal em domínio do tempo, a sensibilidade do hidrofone de calibração e a temperatura da água do tanque onde se efectuou a calibração. Efectuaram medições à distância de 0,6 m e com 100, 200 e 300 J de energia. É importante referir que o fabricante não fez análises de repetibilidade.

Portanto, de acordo com a comparação entre todos os resultados da análise de repetibilidade efectuadas no âmbito deste trabalho, pode-se constatar que a calibração do equipamento melhorou significativamente a repetibilidade do sinal, tal como se pode observar, pelos melhores resultados na **Fase III**. Futuramente, os resultados obtidos na **Fase III** servirão de base comparativa em próximos ensaios.

Tabela 5. 1 - Resumo dos resultados da calibração da placa boomer pelo fabricante (ver **ANEXO III: Certificado de Calibração**).

		Energia (J)		
		100	200	300
Duração do impulso ( $\mu s$ )		160	180	220
Amplitude pico-a-pico (V)		2.32	2.58	2.7
SL	Bar/m	0.305263	0.339474	0.355263
	dB re 1V/ $\mu Pa$	209.6935	210.6161	211.011
Reverberação (%)		0.1	0.12	0.08
Sensibilidade do hidrofone de calibração (V/Bar):		4.56		
Temperatura da água ( $^{\circ}C$ ):		10.6		

Na análise do **sinal em tempo**, para as três fases de aquisição, observa-se, como expectável, que a duração do impulso e a amplitude pico-a-pico aumentam com o aumento de energia. Na **Fase I** a 100 J o impulso tem um comprimento de  $180\mu s$ , a 200 J tem um comprimento de  $200\mu s$  e finalmente, a 300 J tem um comprimento entre  $220\mu s$  e  $225\mu s$ . Na **Fase II** não varia, apresentando comprimentos de impulso de  $180\mu s$  para 100 J e  $200\mu s$  para 200 J. Na **Fase III** obtiveram-se valores mais variáveis. Para 100 J de energia o comprimento do impulso varia entre  $180\mu s$  e  $170\mu s$ , a 200 J varia entre  $200\mu s$  e  $210\mu s$ , e finalmente para 300 J varia entre  $230\mu s$  e  $227\mu s$ . Nenhum destes valores iguala o comprimento de impulso típico relatado pelo fabricante (impulso típico de  $150\mu s$  sem especificação da energia e, da leitura do gráfico,  $160\mu s$  para 100 J, ou mesmo de acordo com o certificado de calibração no **ANEXO III** e **Tabela 5. 1**). O valor mais aproximado, foi obtido na **Fase III**. Mais se constata, que a amplitude pico-a-pico para os impulsos gerados a 200 e 300 J, apresenta diferenças na ordem das milésimas de Volt, embora seja evidente que a parte negativa do impulso a 300 J seja significativamente mais reduzida em relação aos impulsos de 100 e 200 J.

No **ANEXO II: Análise no Domínio do Tempo**, estão representados individualmente os sinais obtidos no domínio do tempo com uma descrição dos parâmetros base. Vem incluída nessa análise a linha de **reverberação máxima** admitida pelo fabricante ( $<10\%$  da amplitude pico-a-pico). Observa-se que na **Fase I** esse limite não é cumprido para 200 e 300 J de energia, sendo ultrapassado no segundo movimento ascendente da curva do sinal, nas três distâncias medidas. Para 100 J de energia esse limite é cumprido. Na **Fase II** o limite de reverberação máxima é ultrapassado nas duas aquisições efectuadas (100 e 200 J). Finalmente, na **Fase III**, para 100 J de energia o limite é cumprido nas três distâncias. Para 200 J de energia verifica-se que o segundo movimento ascendente do sinal se aproxima da linha de reverberação máxima com o aumento da distância. Para 300 J de energia observa-se que o segundo movimento ascendente do sinal está muito próximo do limite de reverberação máximo à distância de 1 m, ultrapassando ligeiramente à distância entre transdutores de 2 m. Desta análise, constata-se que após a **Fase I** de aquisição, já havia indicação de que poderia existir uma deterioração do sinal transmitido pela placa boomer. Na **Fase II** essa deterioração é bastante evidente, pelo que era premente a calibração da fonte acústica. Os dados da **Fase III** indicam que ainda se cumprem os requisitos mínimos, no entanto, é necessária alguma atenção e deverão ser executados novos ensaios o quanto antes.

Os espectros de frequência mostram, como seria expectável, um aumento de potência em decibéis com o aumento de energia e uma diminuição da largura de banda com o aumento de energia. É observável nos espectros uma tendência negativa, que poderá dever-se a ruído no sistema e ao tipo

de filtro aplicado. A partir da definição de Simpkin (2005) (ver **Capítulo 1.2.7.1 Campo próximo (Distância de Fresnel) e Campo Distante**) foi determinada a frequência máxima para a qual o impulso atenua 6 dB ( $W_{-6dB}$ ) a partir dos valores de  $T_p$  obtidos (**Tabela 5. 2**). Não sendo possível a correcção dessa tendência, define-se a largura de banda entre o primeiro valor de frequência calculado (que apresenta valor elevado de potência) que é de 195 Hz e o determinado a partir da definição de Simpkin (2005),  $W_{-6dB}$ .

Tabela 5. 2 - Valores de frequência máxima para a qual o impulso atenua 6 dB ( $W_{-6dB}$ ), de acordo com a definição de Simpkin (2005).

Energia (J)	Fase	Distância entre transdutores (m)	$W_{-6dB}$ (Hz)
100	I	1	9000
		2-3	9350
	II	2	10000
		1	10000
		2	9700
	III	3	10500
200	I	1	6500
		2-3	6700
	II	2	7200
		1	7000
	III	2	6700
		3	7300
300	I	1	5000
		2-3	5300
	III	1	5500
		2	5600

Está assinalado nos gráficos das figuras seguintes (**Figura 5. 1, Figura 5. 2, Figura 5. 3 e Figura 5. 4**) o ponto onde a frequência máxima atenua 6 dB. Note-se que da observação dos gráficos o ponto aparenta corresponder a uma atenuação inferior a 6 dB devido ao facto de existir uma tendência negativa observável a partir das maiores potências. Este assunto será explorado com melhor detalhe em trabalhos futuros.

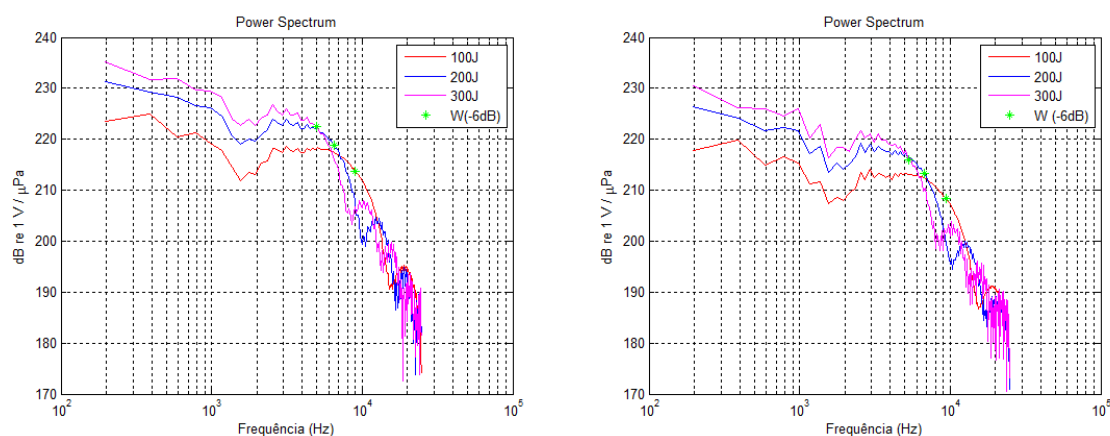


Figura 5. 1 - Representação da frequência máxima com atenuação de 6 dB, para os dados da **Fase I** a 1 m (à esquerda) e 2 m (à direita).

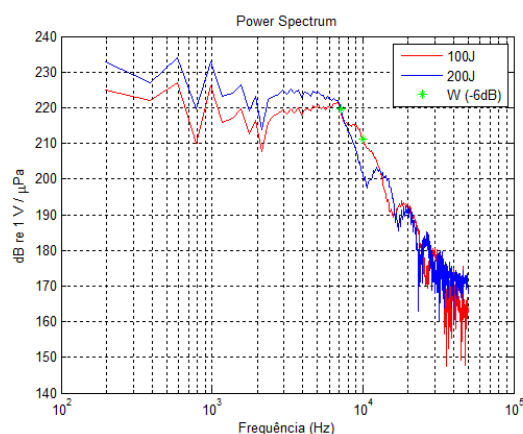


Figura 5. 2 - Representação da frequência máxima com atenuação de 6 dB, para os dados da **Fase II**.

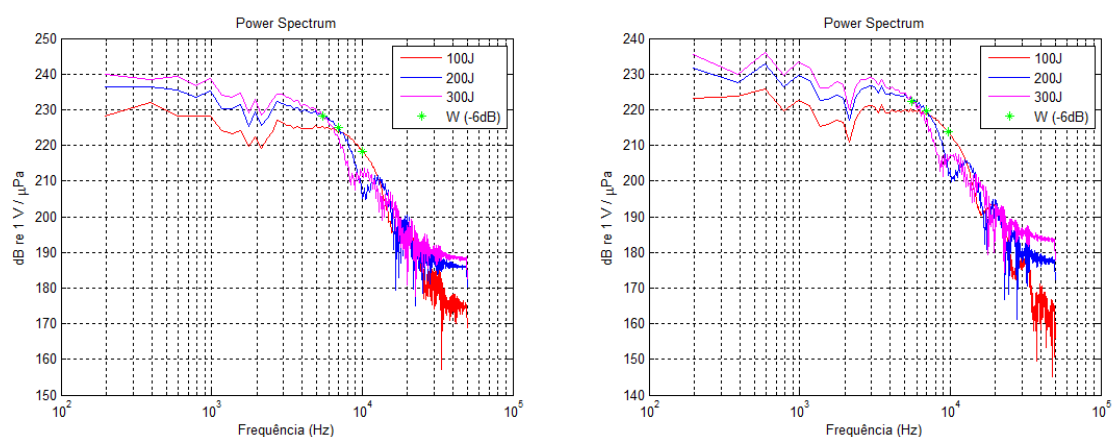


Figura 5. 3 - Representação da frequência máxima com atenuação de 6 dB, para os dados da **Fase III** a 1 m (à esquerda) e 2 m (à direita).

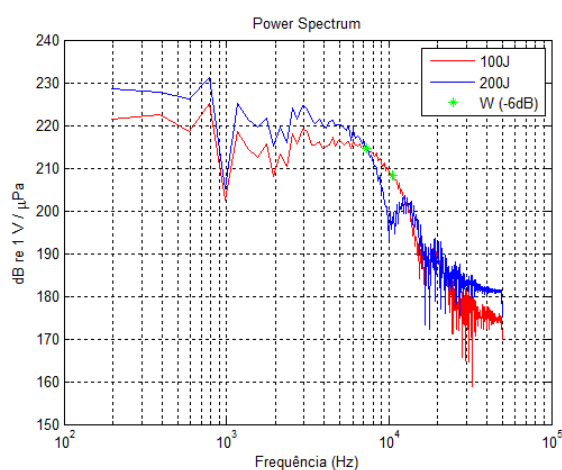


Figura 5. 4 - Representação da frequência máxima com atenuação de 6 dB, para os dados da **Fase III** a 3 m.

De acordo com o fabricante a largura de banda do sinal quando a atenuação é de 6 dB é de 250 a 9105 Hz. Os dados obtidos apontam para larguras de banda entre 195 Hz e 9000 ou 10000 Hz para 100 J de energia. Os dados da **Fase I** de aquisição são mais aproximados da indicação do fabricante.

Na **Fase I** os resultados da determinação de **nível da fonte (SL)** a 100 J são, em média, de aproximadamente 206.4 dB re V/ $\mu$ Pa @ 1 m, para 200 J é de 208 dB re V/ $\mu$ Pa @ 1 m e para 300 J é de 208.5 dB re V/ $\mu$ Pa @ 1 m. Na **Fase II** os valores são, aproximadamente, de 206.8 e 209.2 dB re V/ $\mu$ Pa @ 1 m, para 100 e 200 J, respectivamente. Finalmente na **Fase III**, foram calculados valores médios de SL, aproximadamente, de 206.8 dB re V/ $\mu$ Pa @ 1 m para 100 J de energia, 209.2 dB re V/ $\mu$ Pa @ 1 m para 200 J de energia e 209.6 dB re V/ $\mu$ Pa @ 1 m para 300 J de energia. De acordo com a informação do fabricante o SL típico a 200 J será de 215 dB re V/ $\mu$ Pa @ 1 m. Todos os valores determinados nas três fases de aquisição são inferiores ao indicado pelo fabricante, sendo o valor máximo obtido na **Fase III** para 300 J de energia. Também se verifica que entre 200 e 300 J o valor de SL é muito semelhante. Mais se acrescenta, que os resultados do nível da fonte no certificado de calibração são inferiores à informação que consta no manual do fabricante (AAE, Sound Source Operating Manual, 2003) e nenhum dos ensaios apresenta resultados semelhantes.

## 5.2 Considerações Finais

De acordo com o exposto, pode-se constatar que na **Fase II**, devido aos resultados comparativamente, de menor qualidade (em termos de repetibilidade, forma do sinal e níveis de pressão), a placa *boomer* necessitava nessa fase de uma calibração. É significativo o aumento da qualidade do sinal na **Fase III**, após a calibração junto do fabricante.

Observando os resultados obtidos é possível tecer as seguintes considerações:

1. O sinal transmitido pela placa *boomer* tem boa repetibilidade, de uma forma geral, mesmo quando a placa *boomer* não está nas melhores condições. A análise de repetibilidade permitiu compreender que existe um período de ambientação do diafragma da placa *boomer*, que deve ser estudado e determinado em trabalhos futuros;
2. A tendência negativa observada nos espectros de frequência poderá ser consequência da existência de ruído. É necessário, futuramente, explorar este assunto com maior detalhe e compreender a origem deste comportamento;
3. Na análise do sinal de 300 J de energia o retrocesso da placa após o primeiro movimento é mais curto, o que, como consequência, faz com que o nível da fonte (SL) não seja significativamente superior, relativamente ao disparo com 200 J. No entanto, a diferença na frequência máxima quando a amplitude atenua 6 dB, que é inferior para 300 J de energia, poderá ser informação útil na parametrização de uma aquisição de sísmica de alta resolução;
4. O limite de reverberação, observado na análise em tempo, é também um bom indicador do estado da placa *boomer*. Observa-se que após a **Fase I** já se iniciava uma degradação da placa, e na **Fase II** pode-se considerar que a placa estaria em más condições;
5. As diferenças entre o nível da fonte (SL) do certificado de calibração e os valores determinados no âmbito deste trabalho, devem-se ao facto do valor de amplitude pico-a-pico (em voltagem) ser aqui significativamente inferior. A hipótese que se coloca, para explicar esse fenómeno, poderá ser o facto de que as medições com o hidrofone de

calibração, não estarão a ser efectuadas no eixo de maior directividade da fonte acústica. Tal como Simpkin (2005) concluiu no seu estudo, existe uma diferença de -3 dB do pico de amplitude para uma distância de 20° do eixo principal. Relativamente ao certificado de calibração, observa-se uma diferença de aproximadamente 2 V de amplitude pico-a-pico, ou seja, aproximadamente 6 dB. De acordo com os gráficos publicados por Simpkin (2005), aqui representados na **Figura 2. 6**, implicaria um desvio relativamente ao eixo principal de, aproximadamente 30°. Apesar do desvio ser significativo, a hipótese da eventualidade destas medições não estarem no campo distante, pelo menos no que respeita à distância de 1 m, é corroborada, já que nas figuras (**Fase I Figura 4. 11, Figura 4. 12 e Figura 4. 13; Fase III, Figura 4. 22, Figura 4. 23 e Figura 4. 24**) onde se observa o sinal com a mesma energia a diferentes distâncias, não apresentam diferenças significativas na forma do sinal. Esta hipótese terá que ser analisada com detalhe nos próximos ensaios.

6. Os dados da **Fase III** indicam que ainda se cumprem os requisitos mínimos, no entanto, é necessária alguma atenção, pois o limite máximo de reverberação é crítico para 200 e 300 J de energia. Deverão ser executados novos ensaios, com as correcções sugeridas anteriormente, o quanto antes.

Com as informações obtidas no âmbito deste trabalho, é necessário ainda responder a algumas questões:

1. Qual o período de ambientação da placa, ou seja, quando o sinal estabiliza em relação ao primeiro impulso.
2. Qual a origem da tendência negativa observada nos espectros de frequência.

No futuro serão tomadas as seguintes medidas:

1. Serão efectuados ensaios mais longos, de forma a obter maior número de impulsos. Através da análise de repetibilidade, descrita no âmbito deste trabalho, irá ser observado o período de ambientação da placa.
2. Existindo a possibilidade de não haver um alinhamento correcto com o eixo de maior directividade entre transdutores, serão encontradas soluções estruturais alternativas para a colocação da placa *boomer* no tanque.
3. Serão efectuadas medições de ruído no tanque, com o objectivo de compreender a influência sobre o sinal medido. Considerando a possibilidade de ser esta uma das razões que leva a que haja uma tendência negativa nos espectros de frequência.

Futuramente, os resultados de repetibilidade obtidos na **Fase III** servirão de base comparativa em próximos ensaios.

## Bibliografia

- AAE, A. A. (2002). Capacitor Charging Unit. *Section 1: Operation Manual CSP300P, CSP2200*. United Kingdom.
- AAE, A. A. (2003). Sound Source Operating Manual. *AA200 Boomer Plate, CAT200 Catamaran, Squid 500 Sparker, Squid 2000 Sparker Catamaran*. United Kingdom.
- Au, W., & Hastings, M. (2008). Principles of Marine Bioacoustics. Chapter 2: Measurement and Generation of Underwater Sounds. Springer Science+Business Media.
- Beranek, L. L. (1993). *Acoustics*. New York: Acoustical Society of America.
- Dobrin, M. B., & Savit, C. H. (1988). *Introduction to Geophysical Prospecting*. Singapore: McGraw-Hill, 4th Edition.
- Erbe, C. (2011). *Underwater Acoustics: Noise and the Effects on Marine Mammals*. (Vol. A Pocket Handbook). (3. Edition, Ed.) Canada, Australia, U.K.: Jasco Applied Sciences.
- Fisher, F. H., & Simmons, V. P. (1977). Sound absorption in sea water. *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 62, No. 3, 558-564.
- François, R., & Garrison, G. R. (1982). Sound absorption based on ocean measurements. Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption. *J. Acoust. Soc.*, Vol. 72, No. 6, 1879-1890.
- François, R., & Garrison, G. R. (1982). Sound absorption based on ocean measurements: Part I: Pure water and magnesium sulfate contributions. *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 72, No. 3, 896-907.
- Hayward, H. E., & Edgerton, G. G. (1964). The 'Boomer' Sonar Source for Seismic Profiling. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, 69, nº 14, 3033-3042.
- Hokanson, J. (2011). *The MathWorks, Inc.* Obtido em 25 de 03 de 2014, de MathWorks: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/30023-tdms-reader>
- Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., & Sanders, J. V. (1982). *Fundamentals of Acoustics* (Third Edition ed.). Ney York: John Wiley & Sons.
- Lurton, X. (2008). *An Introduction to Underwater Acoustics. Principles and Applications* (Second Edition ed.). London, New York: Springer & Praxis.
- Lyons, R. G. (2004). *Understanding digital signal processing*. Prentice Hall.
- Matias, L. M., & Costa, P. T. (05 de 10 de 2011). Sismometria (Semana 6). *Sismologia 1/5*. IDL, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- McGee, T. M. (1995). High-resolution marine reflection profiling for engineering and environmental purposes. Part B: Digitizing analogue seismic signals. *Journal of Applied Geophysics*, 33, 287-296.
- McGee, T. M. (2000). Pushing the Limits of High-Resolution in Marine Seismic Profiling. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 5 (4), 43-53.
- Medwin, H. (1975). Speed of sound in water: A simple equation for realistic parameters. *J. Acoust. Soc. Am.*, 58, Nº 6, 1318-1319.

- Medwin, H., & Clay, C. S. (1998). *Fundamentals of Acoustical Oceanography*. USA: Academic Press.
- Mosher, D. C., Simpkin, P. G., & Dickey, P. (1999). Status and Trends of Marine High-resolution Seismic Reflection Profiling: Data Acquisition.
- N.I., N. I. (July de 2008). DAQ M Series. *M Series User Manual*. Austin, Texas: National Instruments Corporation.
- NI. (2004). *LabVIEW Analysis Concepts*. Austin, Texas: March 2004 Edition. © 2000–2004 National Instruments Corporation. All rights reserved.
- RESON, T. (2011). CATALOGUE STANDARD TRANSDUCERS AND HYDROPHONES. *Version CAT13999-1*. RESON.
- Robinson, S., Lepper, P., & Hazelwood, R. (2014). National Measurement Office, Marine Scotland, The Crown Estate. *Good Practice Guide for Underwater Noise Measurement*. ISSN: 1368-6550: NPL Good Practice Guide No. 133.
- Simpkin, P. G. (2005). The Boomer sound source as a tool for shallow water geophysical exploration. *Marine Geophysical Researches*, 171–181.
- Smith, S. W. (1999). *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. California: California Technical Publishing.
- Verbeek, N. H., & McGee, T. (1995). Characteristics of high-resolution marine reflection profiling sources. *Journal of Applied Geophysics*, 33, 251-269.
- Zielinski, T. (2017). Introductory Course on Multiphysics Modelling. *Fundamentals of Acoustics*.
- Zykov, M. (2013). *Underwater Sound Modeling of Low Energy Geophysical Equipment Operations*. Canada.: JASCO Applied Sciences.

Sites consultados:

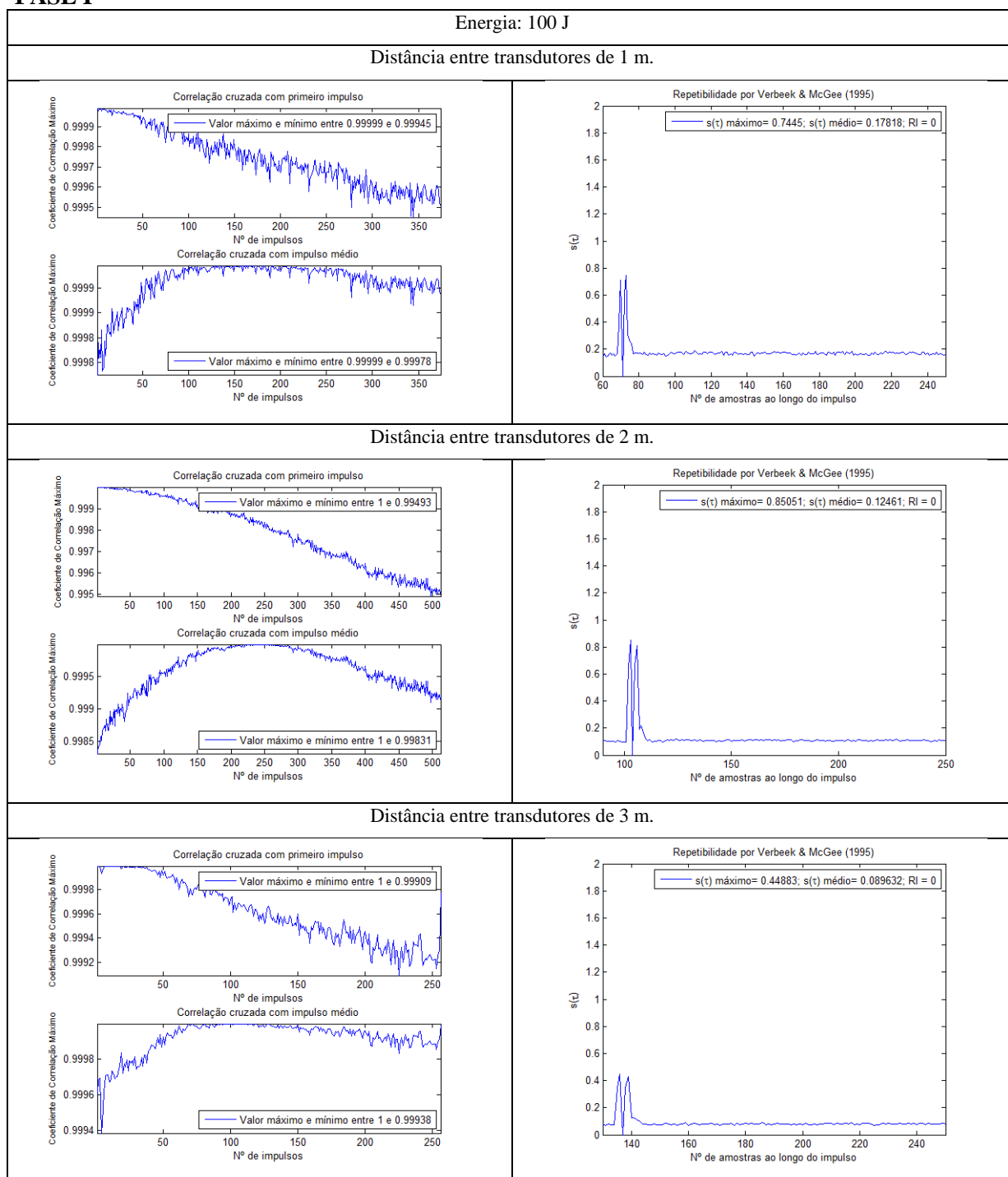
BIPM, B. I. (s.d.). *BIPM*. Obtido em 09 de 01 de 2017, de <http://www.bipm.org/metrology/auv/units.html>



## ANEXO I: Análise de Repetibilidade

Análises de repetibilidade em todas as fases de aquisição.

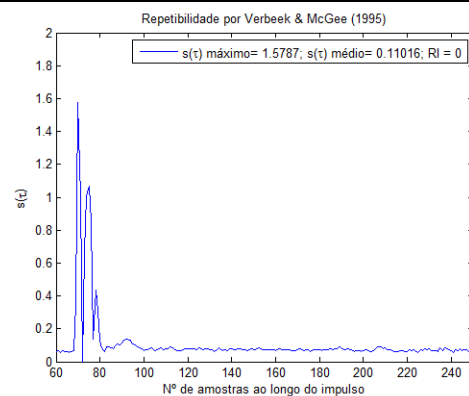
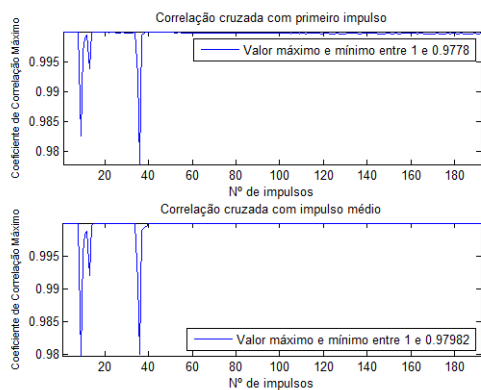
### FASE I



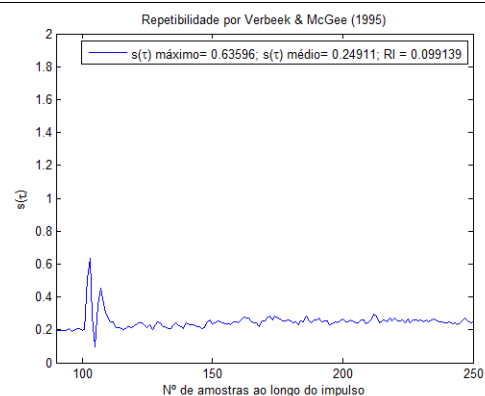
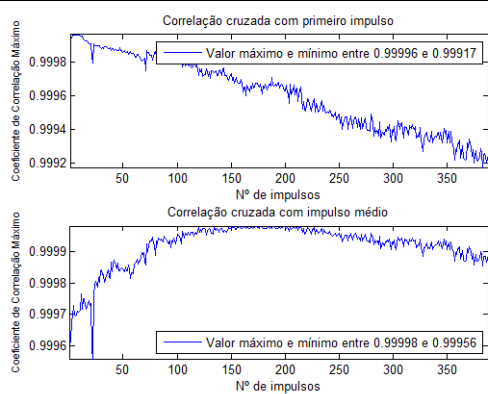
## FASE I

Energia: 200 J

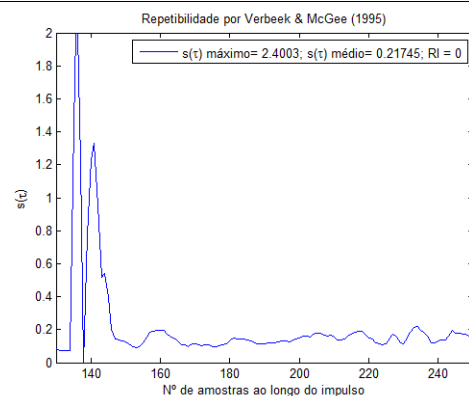
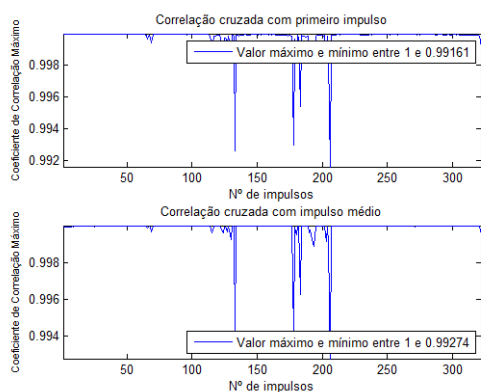
Distância entre transdutores de 1 m.



Distância entre transdutores de 2 m.



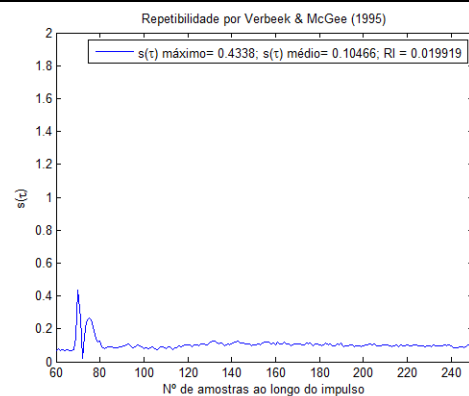
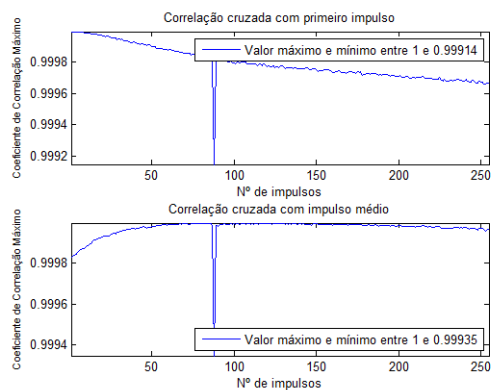
Distância entre transdutores de 3 m.



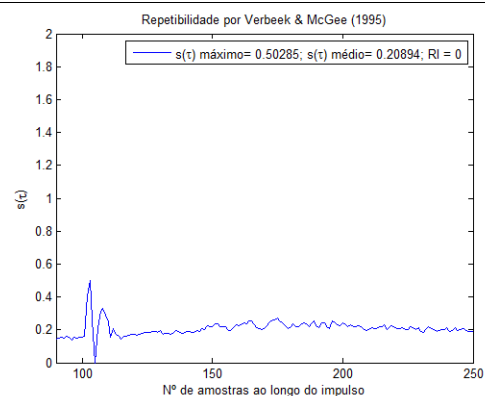
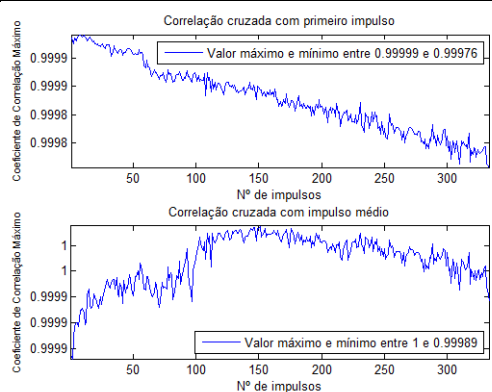
**FASE I**

Energia: 300 J

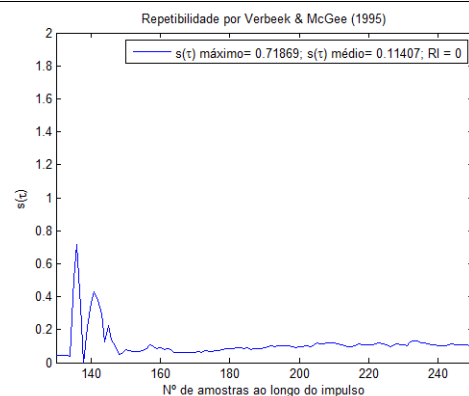
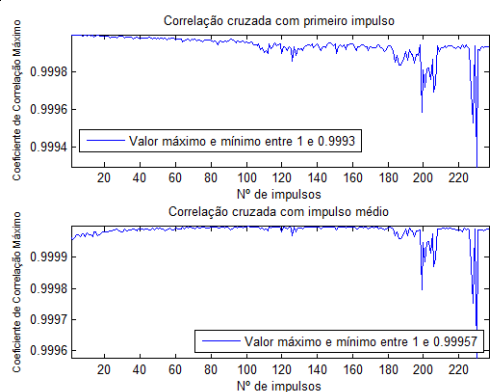
Distância entre transdutores de 1 m.



Distância entre transdutores de 2 m.

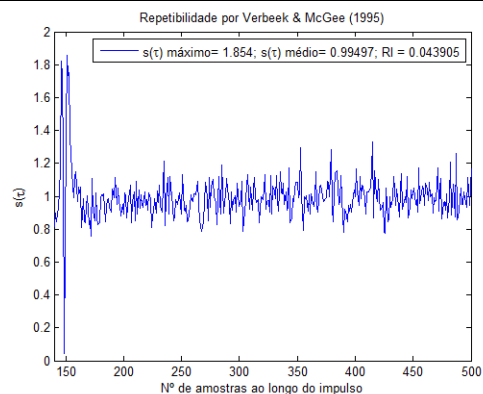
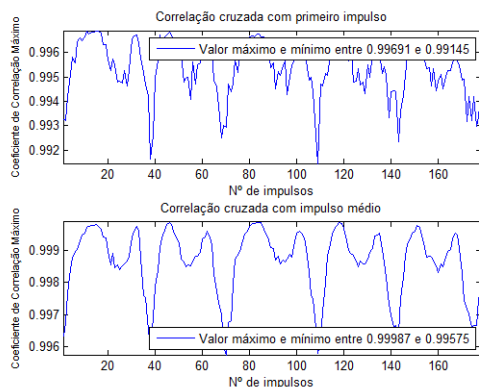


Distância entre transdutores de 3 m.

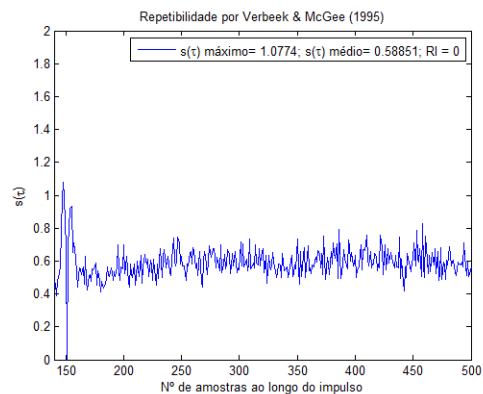
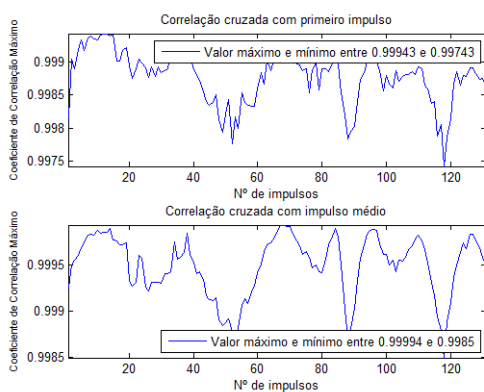


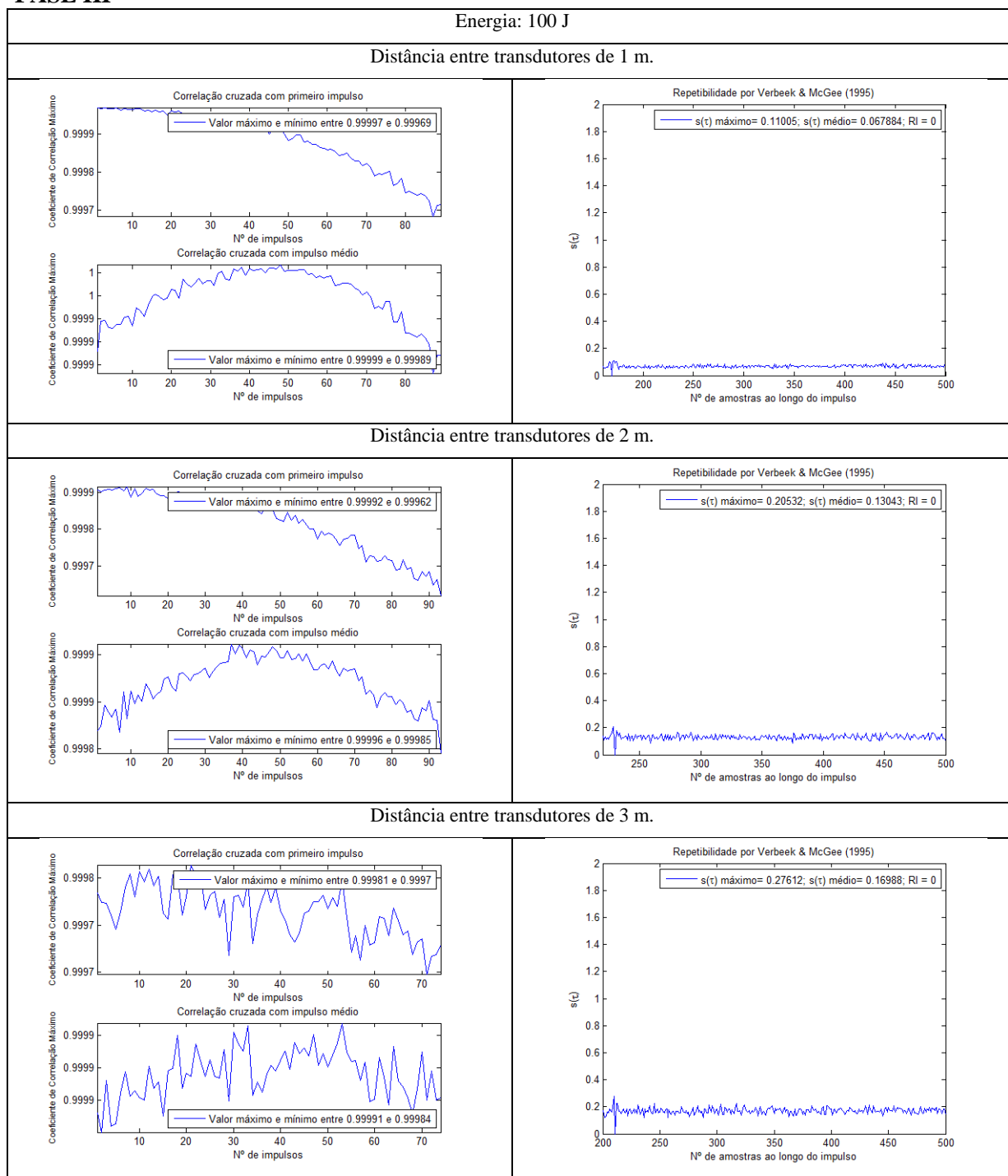
## FASE II

Energia: 100 J



Energia: 200 J.

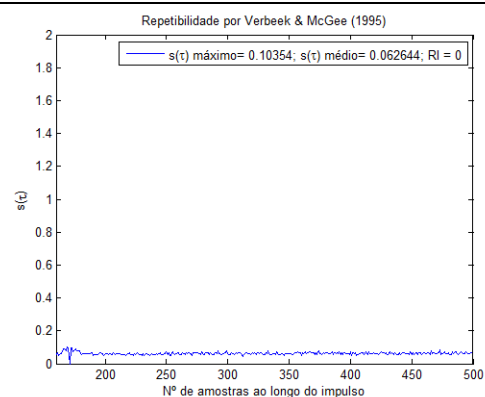
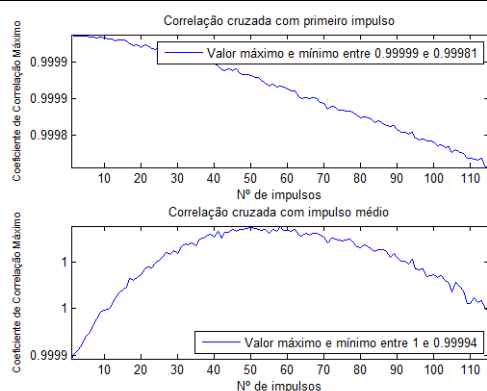


**FASE III**

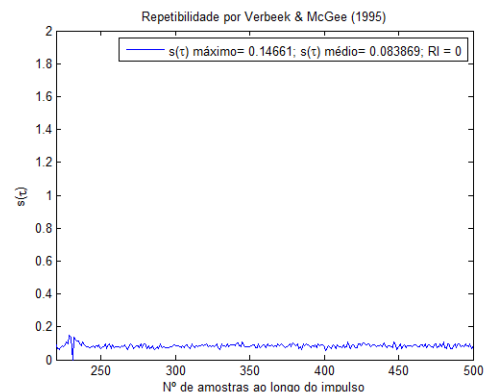
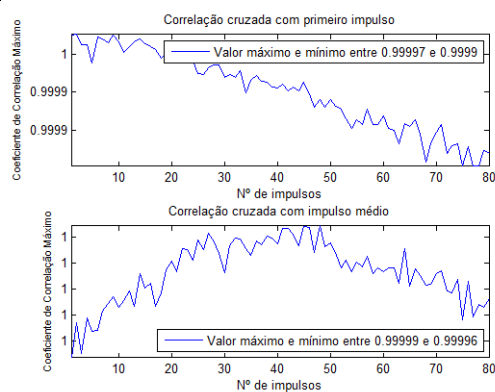
**FASE III**

Energia: 200 J

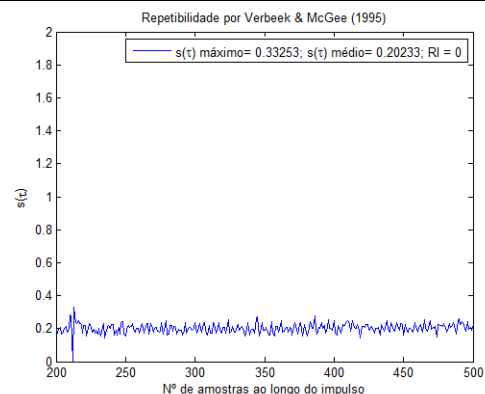
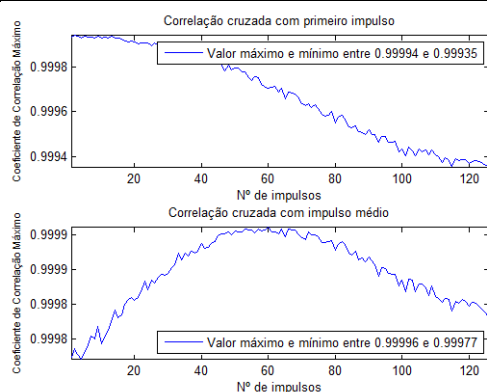
Distância entre transdutores de 1 m.



Distância entre transdutores de 2 m.



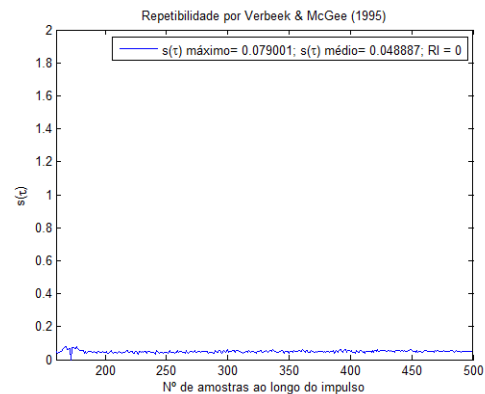
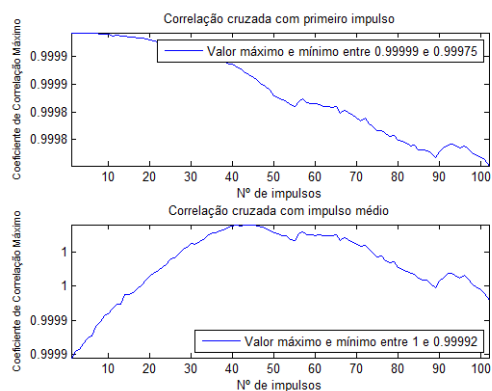
Distância entre transdutores de 3 m.



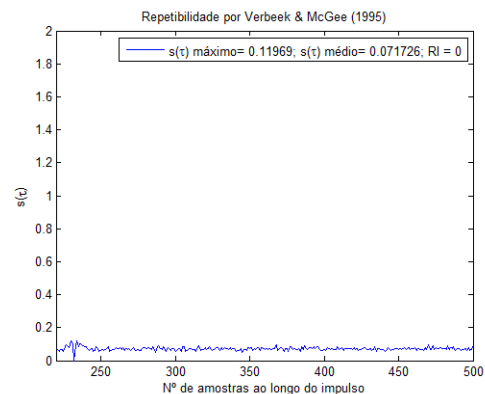
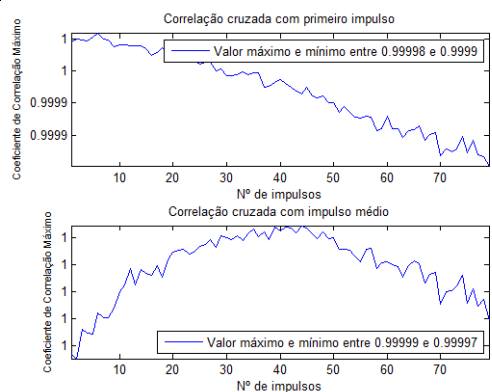
**FASE III**

Energia: 300 J

Distância entre transdutores de 1 m.



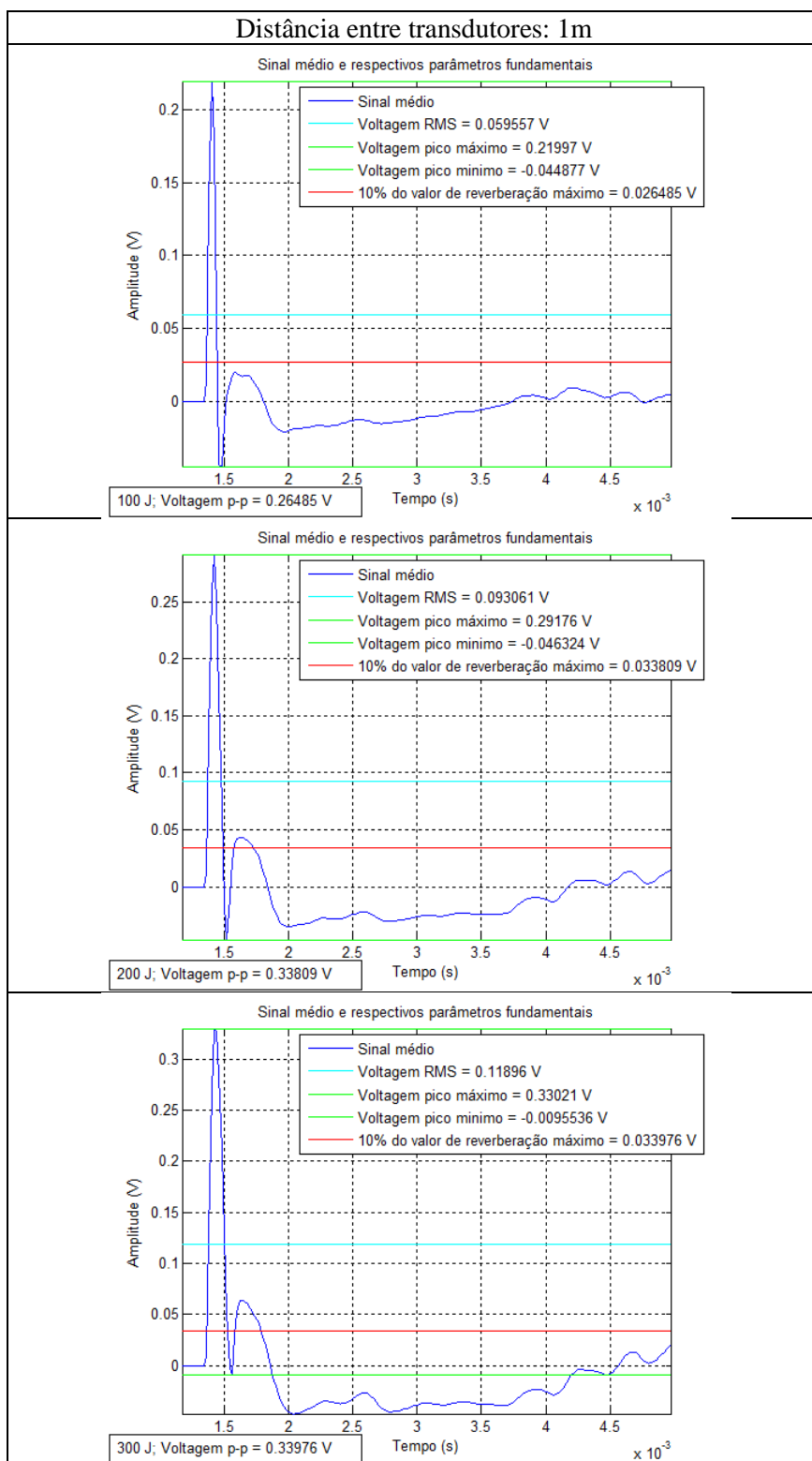
Distância entre transdutores de 2 m.



## ANEXO II: Análise no Domínio do Tempo

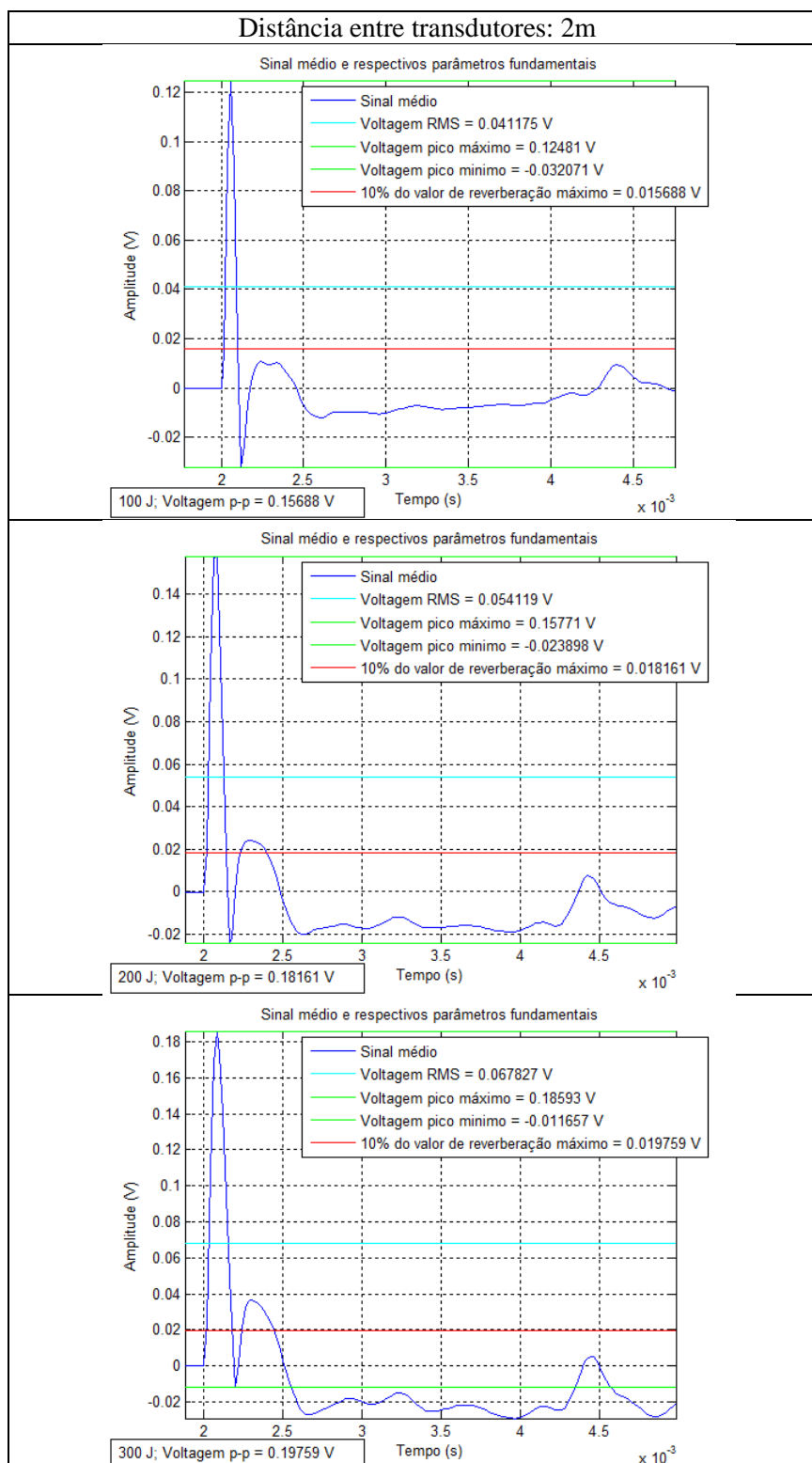
Análise dos parâmetros base na representação do sinal em domínio de tempo.

### FASE I

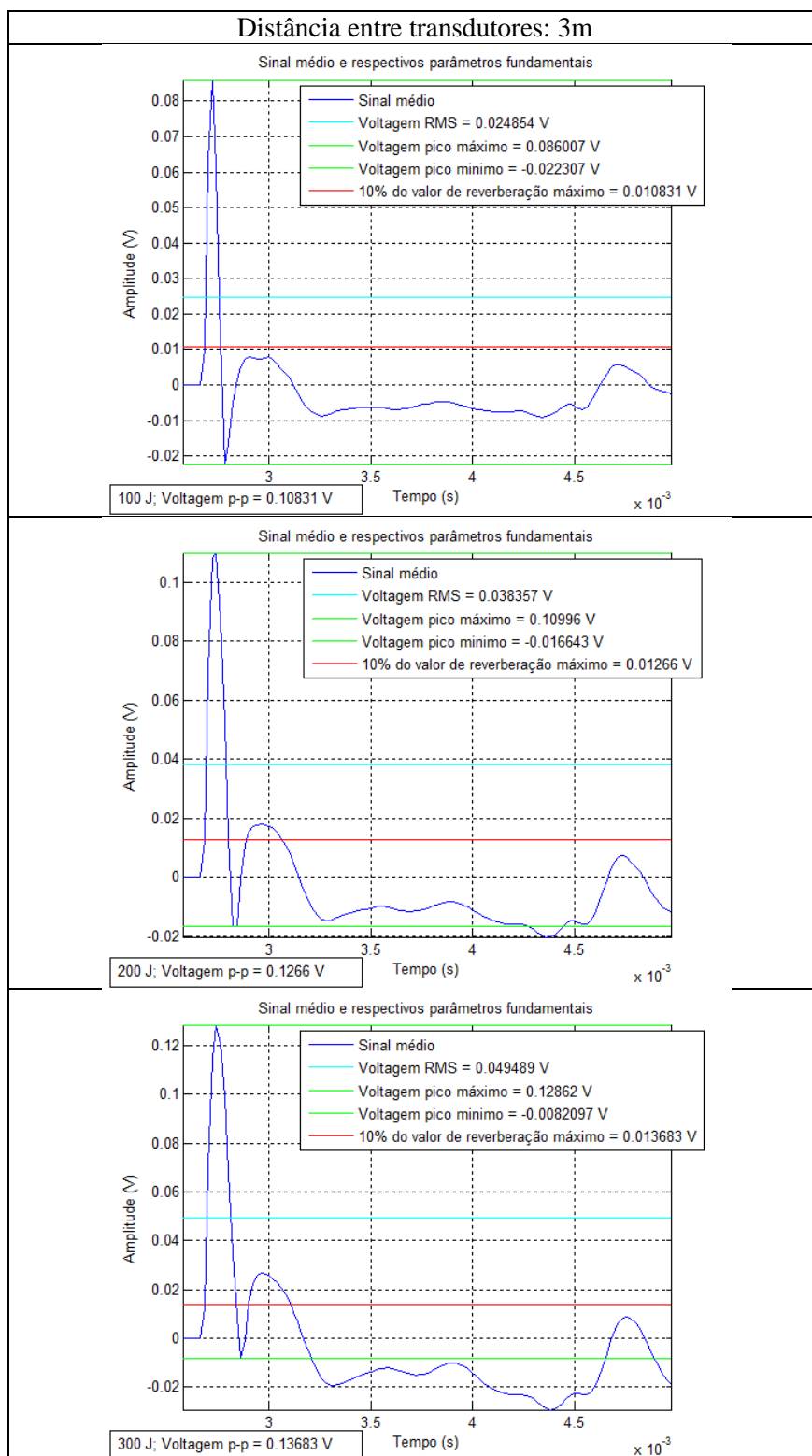




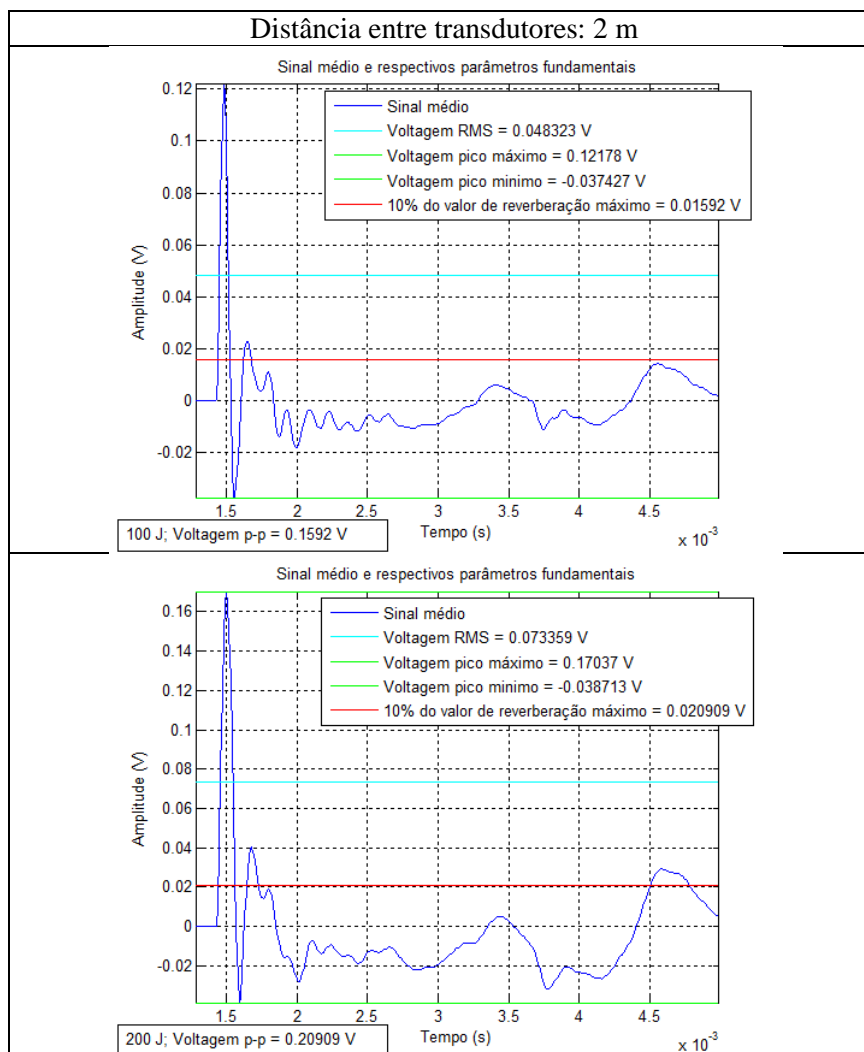
## FASE I



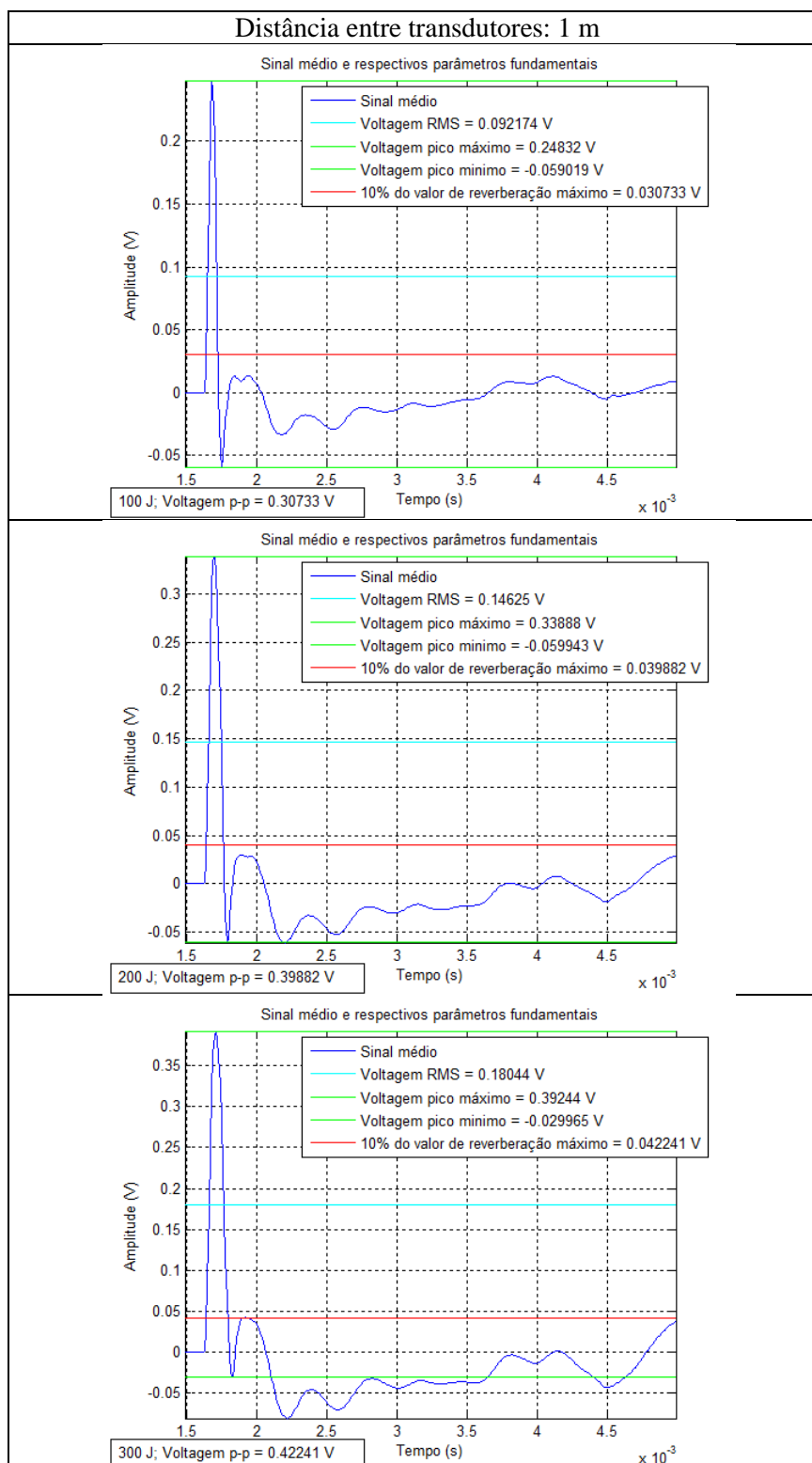
## FASE I



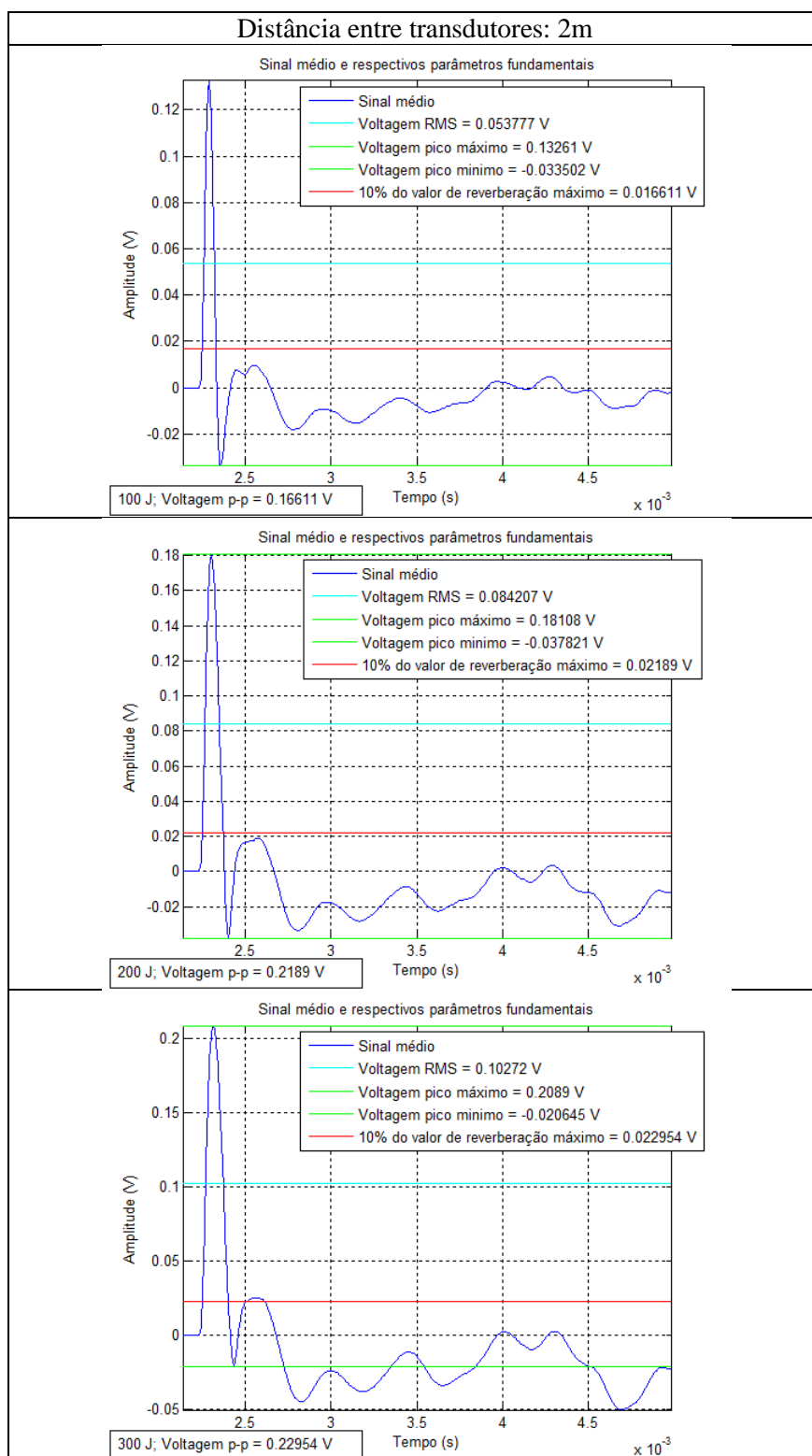
## FASE II



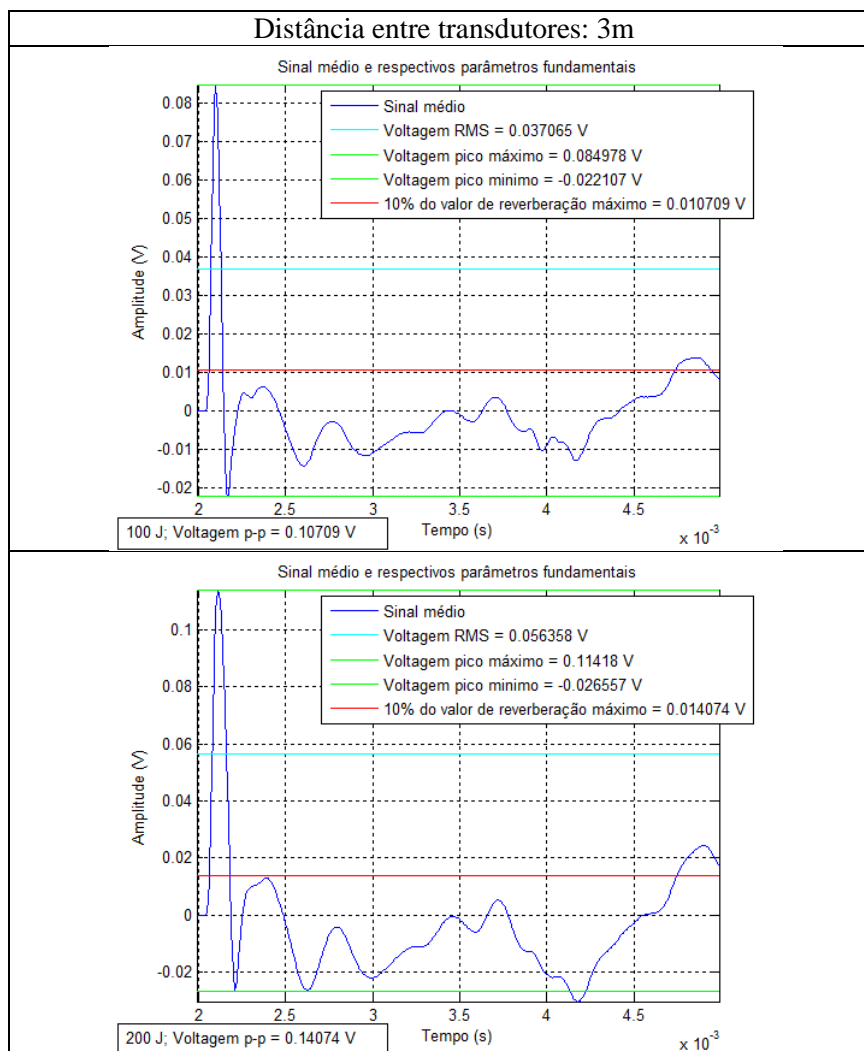
## FASE III



## FASE III



## FASE III



## ANEXO III: Certificado de Calibração

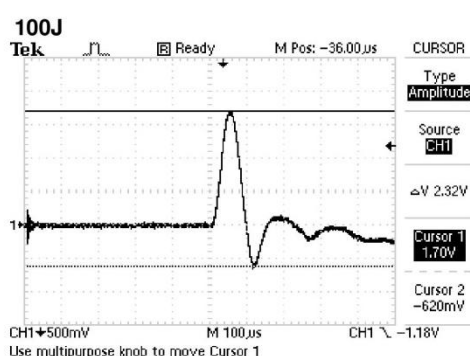
Certificado de calibração fornecido pela *applied acoustics* relativamente à calibração da placa boomer.

 <b>APPLIED ACOUSTICS</b> Underwater Technology		<b>Boomer Plate Pulse Test Certificate</b>			
Document No:	CSP-CSPD-7014/4	Created By:	CD	Date:	26/05/2015
File Saved As:	CSP-CSPD-7014-4_Boomer Pulse Test Certificate.xls	Checked By:	KS	Date:	27/05/2015
DCR Note No:	1639	Approved By:	JME	Date:	27/05/2015

Model :	AA200	Serial Number :	2020760
---------	-------	-----------------	---------

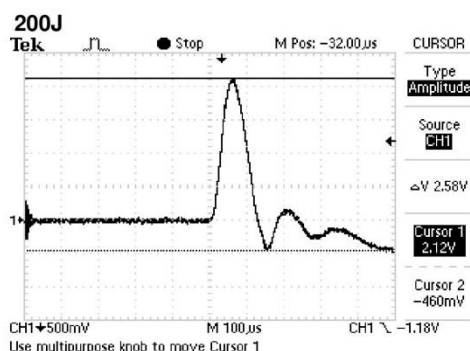
CSP Type:	CSPP	Cal Hydrophone Sensitivity:	4.56 V/Bar
-----------	------	-----------------------------	------------

CSP Serial No:	Test	Hydrophone Serial No:	2509085
----------------	------	-----------------------	---------



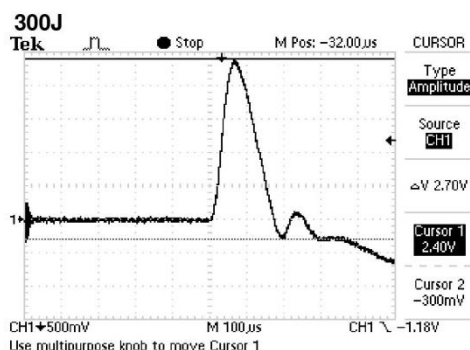
Pulse Width	160	uSec
V peak to peak	2.32	V
Source Level	0.305263	Bar meter
	209.6935	dB re 1.0V/uPa
Reverb Pk-Pk	0.1	Pass

Reverb should be <10% Vpk-pk



Pulse Width	180	uSec
V peak to peak	2.58	V
Source Level	0.339474	Bar meter
	210.6161	dB re 1.0V/uPa
Reverb Pk-Pk	0.12	Pass

Reverb should be <10% Vpk-pk



Pulse Width	220	uSec
V peak to peak	2.7	V
Source Level	0.355263	Bar meter
	211.011	dB re 1.0V/uPa
Reverb Pk-Pk	0.08	Pass

Reverb should be <10% Vpk-pk

Cable Type:	HVC2000 10m
-------------	-------------

Tested By:	KS
------------	----

Water Temp:	10.6 °C
-------------	---------

Date:	18/04/2016
-------	------------

## ANEXO IV: Efeitos de Absorção

A absorção de energia da onda pelo meio, ocorre por razões directamente relacionadas com as características do meio e da frequência transmitida nesse meio. A energia é dissipada devido à viscosidade do meio e às reacções químicas que possam ocorrer (Medwin & Clay, 1998).

Considerando que a diminuição da pressão acústica é proporcional à pressão inicial ( $p$ ) e à distância percorrida ( $dx$ ), num certo intervalo de tempo, podemos escrever a seguinte relação de proporcionalidade (sendo  $\alpha_e$  a constante de proporcionalidade) (Medwin & Clay, 1998):

$$dp = -\alpha_e p dx$$

**Equação 1**

A integração da equação **Equação 1** dá o logaritmo natural, ou seja;

$$p = p_0 e^{-\alpha_e x} \Leftrightarrow \alpha_e = \left(\frac{1}{x}\right) \ln\left(\frac{p_0}{p}\right) \quad Np/m$$

**Equação 2**

A constante de proporcionalidade,  $\alpha_e$ , é uma taxa espacial de decaimento de amplitude e tem unidades SI de nepers por unidade de distância, que pode ser em metros ou quilómetros (Medwin & Clay, 1998).

De forma a passar para notação em decibéis este coeficiente passa a definir-se por  $\alpha$  e pode ser escrito em termos de pressão relativa em dois pontos da onda da seguinte forma:

$$\alpha = \left(\frac{1}{x}\right) \left[ 20 \log \left( \frac{p_1}{p_2} \right) \right] \quad dB/m$$

**Equação 3**

Relacionando a **Equação 2** e **Equação 3**, obtemos:  $1 Np = 8.68 dB$ , ou seja  $8.68\alpha_e = \alpha$  (Medwin & Clay, 1998) :

A absorção em água salgada é determinada considerando a contribuição da água pura e dos sais dissolvidos. De forma a determinar o parâmetro de absorção ( $\alpha$ ) considerando todas as características do meio e mecanismos envolvidos, consideremos os seguintes fenómenos (Lurton, 2008):

- Viscosidade, cujo efeito é mais significativo com o quadrado da frequência;
- Relaxação das moléculas de sulfato de magnésio ( $MgSO_4$ ) abaixo dos 100 kHz;
- Relaxação das moléculas de ácido bórico ( $B(OH)_3$ ) abaixo de 1 kHz.



A relaxação molecular consiste na dissociação de componentes iônicos numa solução, devido às variações locais de pressão causadas pela onda acústica. Este processo é dominante na absorção em água do mar. Se o período da variação de pressão local é mais longo do que o tempo necessário para a molécula se recompor (tempo de relaxação), o processo é reproduzido em todos os ciclos, dissipando a energia permanentemente. Portanto, a atenuação devido a estes processos acontece em frequências mais baixas do que as frequências características da relaxação dos componentes (Lurton, 2008).

Considerando os processos de relaxação descritos, o modelo apresentado por François & Garrison (1982) para a determinação do parâmetro de absorção é escrito da seguinte forma:

$$\alpha = \frac{A_1 P_1 f_1 f^2}{f_1^2 + f^2} + \frac{A_2 P_2 f_1 f^2}{f_2^2 + f^2} + A_3 P_3 f^2 \quad dB/km$$

Equação 4

A frequência  $f$  é expressa em kHz. Os dois primeiros termos representam a contribuição dos dois processos de relaxação descritos (o primeiro para o ácido bórico e o segundo para o sulfato de magnésio) e o terceiro termo é referente à contribuição da absorção em água pura (**Figura 1**). A contribuição da pressão é dada por  $P_1$  e  $P_2$  e as frequências de relaxação são representadas por  $f_1$  e  $f_2$ . Os parâmetros  $A_1$ ,  $A_2$  e  $A_3$  variam de acordo com as propriedades da água.

A contribuição do ácido bórico é determinada da seguinte forma:

$$A_1 = \frac{8.86}{c} \times 10^{(0.78pH-5)} \quad dB \text{ km}^{-1} \text{ kHz}^{-2}$$

$$P_1 = 1$$

$$f_1 = 2.8 (S/35)^{0.5} 10^{(4-1245/8)} \quad kHz$$

Equação 5

Em que  $c$  corresponde à velocidade do som em  $m/s$ .

A contribuição do sulfato de magnésio é determinada da seguinte forma:

$$A_2 = 21.44 \frac{S}{c} (1 + 0.025T) \quad dB \text{ km}^{-1} \text{ kHz}^{-2}$$

$$P_2 = 1 - 1.37 \times 10^{-4} D + 6.2 \times 10^{-9} D^2$$

$$f_2 = \frac{8.17 \times 10^{(8-1990/\theta)}}{1 + 0.0018 (S - 35)} \quad kHz$$

Equação 6

Sendo  $\theta$  o valor absoluto de temperatura ( $T + 273$ ).

O parâmetro  $A_3$ , relativo ao termo da absorção em água pura, varia com a temperatura e foi determinado por François & Garrison (1982).

Para  $T \leq 20^\circ\text{C}$ :

$$A_3 = 4.97 \times 10^{-4} - 2.59 \times 10^{-5}T + 9.11 \times 10^{-7}T^2 - 1.50 \times 10^{-8}T^3, \quad \text{dB km}^{-1} \text{kHz}^{-2}$$

**Equação 7**

Para  $T > 20^\circ\text{C}$

$$A_3 = 3.964 \times 10^{-4} - 1.146 \times 10^{-5}T + 1.45 \times 10^{-7}T^2 - 6.5 \times 10^{-10}T^3, \quad \text{dB km}^{-1} \text{kHz}^{-2}$$

**Equação 8**

François & Garrison (1982) considerando a aproximação de que 1 atm é equivalente a 10 m de profundidade no oceano, o efeito da pressão em água pura é dada pela **Equação 9**:

$$P_3 = 1 - 3.83 \times 10^{-5}D + 4.9 \times 10^{-10}D^2$$

**Equação 9**

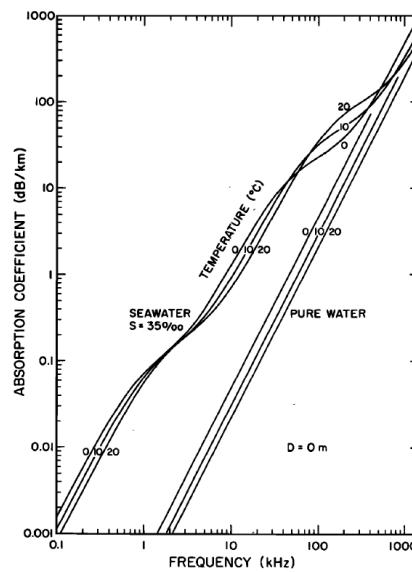


Figura 1 - Absorção em água salgada (pH 8, Salinidade 35 ‰) determinada de acordo com a equação de François & Garrison (1982) a três temperaturas ( $^\circ\text{C}$ ) e para frequências entre 100 Hz e 1 MHz. Estão também representadas as contribuições da água pura na três temperaturas (François & Garrison, 1982).

<sup>o</sup> Salinidade com apresentação de unidades em partes por mil de acordo com a publicação de François & Garrison (1982).

Kinsler, et al. (1982) apresentam outro modelo para a determinação do parâmetro de absorção é escrito da seguinte forma:

$$\alpha = A \frac{f_1 f^2}{f_1^2 + f^2} + B \frac{f_2 f^2}{f_2^2 + f^2} + C f^2 \quad (dB/m)$$

**Equação 10**

Sendo os dois primeiros termos a contribuição dos dois processos de relaxação descritos e o terceiro termo referente à viscosidade da água. As frequências de relaxação  $f_i$  e os coeficientes  $A, B, C$  dependem da temperatura, pressão hidrostática e salinidade; são determinados a partir de experiências em laboratório ou no mar. Fisher & Simmons (1977) através da análise de dados experimentais determinaram os coeficientes referidos, considerando 35<sup>0</sup>/<sub>00</sub> de salinidade<sup>p</sup>, pH 8 e a temperatura em °C. As frequências, em Hz, de relaxação são as seguintes:

$$f_1 = 1.32 \times 10^3 (T + 273.15) e^{-1700/(T+273.15)}$$

**Equação 11**

$$f_2 = 1.55 \times 10^7 (T + 273.15) e^{-3052/(T+273.15)}$$

**Equação 12**

Os coeficientes A, B e C foram simplificados, com exactidão de 2 %, por Kinsler, et al. (1982) considerando a temperatura (T) e pressão ( $P_0$ ) entre 0 a 30 °C e 1 a 400 atm (101 325 a 4,053 × 10<sup>7</sup> Pa), respectivamente:

$$A = 8.95 \times 10^{-8} (1 + 2.3 \times 10^{-2} T - 5.1 \times 10^{-4} T^2)$$

**Equação 13**

$$B = 4.88 \times 10^{-7} (1 + 1.3 \times 10^{-2} T) (1 - 0.9 \times 10^{-3} P_0)$$

**Equação 14**

$$C = 4.76 \times 10^{-13} (1 + 4.0 \times 10^{-2} T + 5.9 \times 10^{-4} T^2) \times (1 - 3.8 \times 10^{-4} P_0)$$

**Equação 15**

Kinsler, et al. (1982) sugerem uma aproximação das equações anteriores para determinação do coeficiente de absorção,  $\alpha$ , em ondas acusticas que se propagam em água salgada a 5° C e 1 atm:

$$\alpha = \left( \frac{8 \times 10^{-5}}{0.7 + f^2} + \frac{0.04}{6000 + f^2} + 4 \times 10^{-7} \right) f^2$$

**Equação 16**

Sendo  $f$  em kHz e  $\alpha$  em dB/m.

<sup>p</sup> Salinidade com apresentação de unidades em partes por mil de acordo com a publicação de Fisher & Simmons (1977).